Aus dem Röntgeninstitut (Vorstand: Oberarzt Dr. med. habil. A. KOHLER)
bei der Chirurgischen Universitätsklinik München
(Vorstand: Prof. Dr. G. MAGNUS)

Die Streuzusatzstrahlung bei Pendelbestrahlungen in Abhängigkeit von der Feldbreite

(gemessen an der Oberfläche)

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin

der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Friedrich Katz

aus Stuttgart

München, 17. April 1940

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Bayer. Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Referent:
Dozent Dr. Felix Jaeger, Oberarzt

Tag der mündlichen Prüfung:
20. September 1940

Druck: Buchdruckerei Müller & Bass, Tübingen (Württ.)

Inhalts-Verzeichnis

1. Einleitung

2. Messung der Streuzusatzstrahlung bei der Pendelbestrahlung

I. Versuchsanordnung
a) Die Phantome
b) Das Pendelgerät
c) Das Meßgerät

II. Grundlagen und Fragen der Berechnung
a) Berechnung der Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche während der Rotations- oder Pendelbestrahlung
b) Die Erfassung der Streuzusatzstrahlung bei der Pendelbestrahlung

III. Die Versuchsergebnisse
a) Am Oberschenkelphantom
b) Am Beckenphantom
c) Vergleich der Ergebnisse aus a) und b)
d) Zusammenfassung

3. Abbildungen

4. Schrifttum

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548306_0143

Einleitung.

Seitdem die Röntgenstrahlen zu therapeutischen Zwecken Anwendung finden, ist es ein entscheidendes Problem, in der Tiefe des Körpers Dosen anzuwenden, welche zwar Tumorgewebe vernichtend treffen, dabei aber das gesunde Gewebe nicht beeinträchtigen und schädigen. Diese Forderung findet eine natürliche Unterstützung in der Tatsache, daß die Geschwulstzelle (Carcinom- und Sarkomzelle) gegen Röntgenstrahlen empfindlicher reagiert als die gesunde Zelle. Die Richtigkeit dieser Anschauung wird unter anderem bestätigt durch Versuche mit Röntgenbestrahlung von Explantaten normaler Zellen und Tumorzellen, die von Vollmar in gemeinsamer Arbeit mit Rajewsky in Frankfurt durchgeführt wurden [1]). Jede Strahlung, die in den Körper eindringen will, um Bezirke in der Tiefe zu erreichen, muß durch die strahlenempfindliche Haut hindurchgehen. Da die Strahlenintensität rasch gegen die Tiefe hin abnimmt, — zunächst am raschesten in den oberflächlichen Schichten —, muß man der Oberfläche und den oberflächlichen Schichten sehr viel höhere Dosen zumuten als dem Geschwulstgewebe in der Tiefe, wenn man gegen dieses erfolgreich vorgehen will. Man begibt sich dabei in die Gefahr, der Haut mehr zu schaden als dem Tumorgewebe im Körper. Es ist deswegen für eine Tiefentherapie von großer Wichtigkeit, ein möglichst günstiges Verhältnis der in der Tiefe absorbierten Strahlenmenge zu der in der Oberfläche absorbierten Strahlenmenge zu erzielen, kurz gesagt, den „Dosenquotienten“ so günstig wie möglich zu gestalten. Aus dem Wunsche, die Gefahr einer Hautschädigung für den bestrahlten Patienten auszuschalten oder wenigstens zu mindern, entstanden die Gedanken neuer Bestrahlungsmodifikationen, und es wurden im Laufe der Zeit die verschiedensten Versuche in dieser Richtung unternommen.

Um eine Überbestrahlung der Haut bei Tiefenbestrahlung zu vermeiden, verabreichte man anstelle einer einmaligen großen therapeutischen Wirkungsdosis dieselbe in mehreren Sitzungen und

zerlegte sie damit in eine Anzahl kleinerer Dosen. Man ging von der Überlegung aus, daß kleine Strahlendosen auch eine kurze Latenzzeit haben, und daß es somit möglich sein müsse, in kurzen Zeitabständen kleine Dosen zu verabreichen, ohne eine schädigende Wirkung auf die Haut auszuüben. Diese Bestrahlungsart bezeichnete man als „fraktionierte Bestrahlung“ [2]).

Ein anderer Versuch bestand in der Anaemisierung der Haut während der Bestrahlung durch Druck oder durch gefäßkontrahierende Mittel wie beispielsweise Adrenalin, um sie dadurch unempfindlicher gegen Röntgenstrahlen zu machen („Desensibilisierungsmethode“, angegeben von Schwarz, H. E. Schmid, Jessen und Rzewnski, Christen) [2]).

Eine Verbesserung des Dosenquotienten, wie Christen das Verhältnis der Strahlenabsorption von Oberfläche zu Tiefe nennt, läßt sich mit den oben genannten beiden Methoden nicht erreichen.

Als besonders schädigend für die Haut wurden sehr bald die weichen Strahlen erkannt, die chemisch und biologisch am kräftigsten wirksam sind, da von ihnen schon durch sehr dünne Gewebeschichten ein großer Teil absorbiert wird. Man ging deshalb dazu über, die weichen und auch die mittelweichen Strahlen durch Filterung von der Haut fernzuhalten. Von der harten Strahlung, die auf diese Weise entsteht, wird vom Gewebe weit weniger absorbiert. Von Gauss stammt die erste Veröffentlichung (1911) über die Beobachtung einer günstigeren Erythemzahl bei gefilterter gegenüber ungefilterter Strahlung [2]).

Rost und Krüger [3]) wiesen ferner im Experiment nach, daß durch Filterung der Röntgenstrahlen eine wesentliche Verbesserung des Verhältnisses zwischen der Strahlenabsorption in der Oberfläche und der Tiefe zu erreichen ist. Der Dosenquotient läßt sich also durch Filterung verbessern zugunsten eines größeren Nutzeffektes bei der Tiefenbestrahlung.

Auch die Klinik kam zu denselben Ergebnissen, wie ein Bericht von Borell [2]) zeigt. In diesem Bericht über „Klinische Untersuchungen über die Erythemgrenze bei gynaekologischer Röntgentiefentherapie mit stark gefilterten Strahlen“ kommt Borell [2]) zu dem abschließenden Ergebnis, daß stark gefilterte Strahlen für die Haut weniger gefährlich sind als schwach gefil-

terte, da die die Haut schädigenden weichen Strahlen durch das Filter absorbiert werden.

Zur selben Zeit (1913) berichtet H. Meyer[4]) (Bremen) über andere Wege, die Hautbelastung bei Tiefenbestrahlung herabzusetzen. Man war bei der Anwendung der Tiefentherapie zur Methode der Kreuzfeuerbestrahlung übergegangen, die darin bestand, daß man einen Herd von mehreren Hautfeldern aus zu erreichen suchte. Der Tumor in der Tiefe des Körpers blieb also andauernd unter Strahlenwirkung, während die Bestrahlung der Haut auf mehrere Stellen verteilt wurde. Damit war der Anfang gemacht, durch Änderung des Strahlenweges von der Oberfläche zum Tumor eine Schädigung des gesunden Gewebes, vor allem der Haut, zu vermeiden. Es bestand anfangs durchaus keine ungeteilte Meinung über die Anzahl der anzuwendenden Hautfelder. Während beispielsweise die Hamburger Schule für eine Bestrahlung von 2—3 Hautfeldern aus eintrat, wurden von der Freiburger Schule für die Tiefenbestrahlungen 30—50 Felder angewandt. Angeregt durch die letztere Methode wurde im Röntgentechnischen Institut in Kiel von Pohl eine Röntgenröhre konstruiert, die langsam von einer Seite zur anderen hinüberschwingen konnte. Sie war zunächst einmal im Gebrauche wesentlich wirtschaftlicher, da nicht jedes Hautfeld neu eingestellt werden mußte, vielmehr der Apparat selbsttätig ein Feld nach dem andern einstellte. Der Tumor bildete das Kreiszentrum, um welches die Röhre in gleichmäßigem Gang rotierte oder pendelte. Während der Tumor andauernd im Strahlenbereich war, wurde dem einzelnen Hautfeld nur mehr ein Bruchteil der Gesamtbestrahlungsdosis zugemutet, da jede Stelle der Haut nur einen Teil der Gesamtzeit im Strahlenbereich lag. Meyer[4]) arbeitete mit dem Gerät und gab 1913 einen ausführlichen Bericht über die Art und Anwendung dieser neuen Konstruktion und ihrer Vorteile für die Tiefentherapie. Nach Henschke[5]) hat sich Kohl, der Schöpfer der Rotationsbestrahlung, wie diese Methode der Bestrahlung mit schwingender Röhre genannt wurde, schon im Jahre 1906 eine ähnliche Anordnung patentieren lassen. Bei ihm kreist die Röntgenröhre so, daß ihr Zentralstrahl einen Kegelmantel beschreibt, an dessen Spitze der zu bestrahlende Geschwulstherd liegt.

Mit der Einführung der Rotationsbestrahlung in die Therapie schien der Anfang zu einer völlig neuen Entwicklung der Tiefentherapie gemacht. Trotz der klaren Überlegungen und der technisch sehr zweckmäßigen Ausführung geriet das Verfahren wieder in Vergessenheit. In den Fachzeitschriften finden sich jedenfalls keine Hinweise, daß der Gedanke zunächst weiter verfolgt worden wäre. Verschiedene Autoren sind der Ansicht, daß vor allem der Weltkrieg die Weiterentwicklung unterbrochen habe, und daß die Entwicklung und Vervollkommnung der Hochspannungstechnik mit ihren durchdringenderen und härteren Strahlen das Interesse an der Rotationsbestrahlung in den Hintergrund gedrängt habe [5]) [6]).

So verging eine Reihe von Jahren, in denen sich die Aufmerksamkeit vorwiegend der Weiterentwicklung der Hochspannungstechnik zuwandte, und niemand dachte daran, die Rotationsbestrahlung therapeutisch auszuwerten.

Teilweise ohne von den früheren Arbeiten und Versuchen etwas zu wissen, begannen mehrere Autoren in den vergangenen zehn Jahren für sich, eine Verbesserung der Therapiemöglichkeiten bei Tiefenbestrahlung durch verschiedene Arten der Rotations- bzw. Pendelbestrahlung zu versuchen. Andere machten auf die früheren Gedanken wieder aufmerksam und suchten dadurch eine Weiterentwicklung anzuregen. Über beide Bemühungen möchte ich im Nachfolgenden berichten.

Im Jahre 1928 wurde von Archangelskij [7]) in einer Sitzung der Moskauer Röntgengesellschaft der Vorschlag gemacht, die von H. Meyer [4]) einst angegebene Tiefentherapie mit pendelnder Röntgenröhre wieder aufzunehmen und mit der inzwischen fortgeschrittenen Technik zu vervollkommnen. Im Wesentlichen lehnte er sich in seinen Forderungen bezüglich der Bestrahlungstechnik an die von H. Meyer [4]) gemachten Ausführungen an. Als weitere Verbesserung schlug er die zusätzliche Benutzung einer Wabenblende vor und beleuchtete die Vorzüge dieser Technik bei der Tiefenbestrahlung. Über eine Anwendung durch Archangelskij [7]) ist mir aber nichts bekannt geworden.

Fünf Jahre später berichtete K. Mayer [8]) auf einem Kongreß in Madrid 1933 über die Möglichkeit, die Strahlendosis zu kon-

zentrieren durch Rotation des Patienten um seine Körperlängsachse auf einer Krankentragevorrichtung. Der Krankheitsherd sollte sich in der Drehachse befinden, und der Patient mit elastischen Leibgurten auf dem Tragtische festgehalten werden. Als besonderen Vorteil dieser Bestrahlungsweise sah K. Mayer [8]) die damit verbundene geringere Strahlenbelastung der Haut und der oberflächlichen Gewebeschichten. Ob diese Anregung von ihm selbst in die Praxis übernommen wurde, entzieht sich meinem Wissen, dagegen berichtet K. Mayer [9]) 1939 über eine neue Methode der Bestrahlung mittels bewegter Radiumpräparate, um die Haut vor Überbestrahlung zu schützen.

Als F. Dessauer [10]) auf dem ersten Kongreß der Österreichischen Gesellschaft für Röntgenkunde und Strahlenforschung über Rotationsbestrahlung sprach, versicherte er, daß er schon 1932 im Kreise seiner Mitarbeiter in Frankfurt den Vorschlag zur Rotationsbestrahlung gemacht habe und nur durch dringende Arbeiten von der Erprobung und Ausarbeitung abgehalten worden sei. Ohne von den früheren und letzten Arbeiten und Anregungen in dieser Richtung Kenntnis zu besitzen, habe er sich schon längere Zeit mit dem Gedanken der Rotationsbestrahlung getragen. Die Ausführung dachte sich Dessauer so, daß der Patient auf einer Drehscheibe rotiert, wobei der Krankheitsherd in die Drehachse eingestellt wird. An Meßergebnissen aus Versuchen zeigte er, daß dabei der Haut wesentlich geringere Dosen verabfolgt werden als bei anderen Bestrahlungsarten, wie beispielsweise bei der Mehrfelder- und Kreuzfeuerbestrahlung.

Die Rotation des Patienten um eine horizontale Achse, wie K. Mayer [9]) sie vorschlägt, lehnte Dessauer [10]) ebenso wie Kohler [6]) ab, weil sich dabei zu starke Verlagerungen der Körperhöhleninhalte ergeben, und nicht mehr eine tadellose Einstellung des Tumors über die ganze Dauer der Bestrahlung in der Rotationsachse gewährleistet ist.

Über weitere Versuche und klinische Ergebnisse mit Rotationsbestrahlung berichten Dessauer, Lion und Gökmen [11]) 1937. Zunächst gibt Dessauer eine rechnerische Darstellung des Bestrahlungszeitunterschieds zwischen Oberfläche und Tiefe und seiner Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren, sowie der Rück-

wirkung auf die Oberflächen- und Tiefendosis. Er nennt dabei das Verhältnis $\frac{\text{Herddosis}}{\text{Oberflächendosis}}$ den Rotationstiefenquotienten. In einer kurzen und klaren Beschreibung werden wir dann mit der Methode der Rotationsbestrahlung bekannt gemacht, so wie sie in seiner Klinik ausgeführt wird. Der Patient sitzt auf einem Drehstuhl mit Kopf- und Armstützen. Der Stuhl ist auf einer Plattform befestigt, die um eine vertikale Achse drehbar ist und gleichzeitig zum Einstellen des Patienten auf einem Schienenkreuz in der Art eines Kreuztisches verschoben werden kann. Der Krankheitsherd bleibt während der Drehung immer in der Rotationsachse der Drehscheibe, auf welche der Strahlenkegel der Röntgenröhre eingestellt wird. Hier rotiert also der Patient, während die Röhre fixiert bleibt.

Messungen an einem Kopf-, Hals- und Bauchphantom lassen erkennen, daß bei der Bestrahlung eine weitgehende Schonung der Haut und des gesunden Gewebes über dem Tumor erreicht werden kann. Eine weitere Bestätigung erfährt diese aus dem Experiment gewonnene Erkenntnis durch klinische Berichte, welche Dessauer anführt.

Ähnlich wie Dessauer, der sich längere Zeit mit dem Gedanken der Rotationsbestrahlung trug und diesen Gedanken dann von anderer Seite plötzlich ausgesprochen sah, mag es auch Kohler [6]) ergangen sein. Auch er arbeitete seit ungefähr zehn Jahren an demselben Problem. In einer Reihe von Versuchen, unter denen er auch zunächst die Rotation des Patienten vornahm, gelangte er zu der Ansicht, daß es für eine Therapie, die voraussetzt, daß der Krankheitsherd mit möglichster Sicherheit andauernd durch die Strahlen getroffen wird, notwendig ist, den Patienten so zu lagern, daß eine Verschiebung des Krankheitsherdes während der Bestrahlung ausgeschlossen ist. In Verfolgung dieses Gedankens gelangte Kohler dann zur Konstruktion des Pendelgerätes, wie er es in der Monatsschrift für Krebsbekämpfung [12]) beschreibt. Der Patient wird auf einem Operationstisch bequem gelagert und durch Auflegen bzw. Unterlegen von Sandsäckchen in seiner Lage festgehalten. Um ihn pendelt auf einem Kreisbogen, dessen Mittelpunkt vom Tumor gebildet

wird, die Röntgenröhre. Dadurch ist die Gewähr gegeben, daß sich der Tumor während der Bestrahlungsdauer auch immer im Strahlenkegel befindet. Seit zwei Jahren findet diese Pendelbestrahlung im Röntgeninstitut der Münchener Chirurgischen Universitätsklinik Anwendung. Kohler [12]) berichtet in der Monatsschrift für Krebsbekämpfung über therapeutische Erfolge bei tiefliegenden Krebsen des Verdauungstraktes, welche einen weiteren Fortschritt in der Behandlung inoperabler Tumoren anzeigen. Er teilt ferner mit, daß trotz großer Gesamtdosen höchstens leichte Hautreaktionen beobachtet wurden.

Zu berichten ist außerdem von einem neueren Konstruktionsvorschlag von Henschke [5]), mit dem eine weitere Erhöhung der Tiefendosis erreichbar erscheint. Es ist eine Kombination der Rotierung des Patienten auf einem Drehtisch um eine vertikale Achse mit gleichzeitiger Verstellbarkeit der Röntgenröhre — bei gleichbleibendem Focushautabstand — und damit Änderung des Einfallswinkels der Strahlen zur Drehachse. Durch die Rotierung des liegenden Patienten entsteht ein Strahlenkegelmantel im Gewebe mit dem Tumor an der Spitze. Durch die Verstellung der Röntgenröhre wird dieser Kegelmantel bald stumpfer, bald spitzer, und auf der Haut entsteht ein bestrahlter Bezirk von der Form eines Kreisrings mit bald größerem, bald kleinerem Durchmesser.

Wenn ich über die Versuche berichte, welche zum Ziele haben, die Hautdosis gegenüber der Herddosis bei der Tiefenbestrahlung herabzusetzen, so muß ich auch noch ein anderes Verfahren erwähnen. Es ist die sog. „Konvergenzbestrahlung", die, wie ich aus einer Zusammenstellung von Henschke [5]) ersehe, schon 1914 durch von Wieser angegeben wurde. Sie beruht auf einer Linse, welche die Strahlen sammelt und durch eine Wabenblende aus Blei hindurchschickt. Ein verbessertes Verfahren stammt von Rahm. Auch in der letzten Zeit wurde dieser Methode wieder Aufmerksamkeit zugewandt durch Nakaidzumi [13]) 1937, der durch eine bewegliche Röntgenröhre die frühere Anordnung zur Konvergierung der Röntgenstrahlen wesentlich verbessern konnte. In einer weiteren Mitteilung gibt Nakaidzumi mit Motida [14]) am Phantom gemessene Kurven bekannt über die Dosisverteilung bei Konvergenzbestrahlung und ihre zeitliche Abhängigkeit.

Die Konvergenzbestrahlung beruht also auf der Umwandlung der divergenten Röntgenstrahlen — durch einen in den Strahlengang eingeschalteten Konvergenztubus — in konvergente Strahlen, die sich in der Körpertiefe in einem bestimmten Punkt vereinigen und so eine nach der Tiefe zu an Intensität nicht abnehmende, sondern zunehmende Strahlung bewirken, während die Haut nur einen Teil dieser erhöhten Tiefendosis bekommt.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Entwicklung bis zur Pendelbestrahlung durch den Wunsch geleitet wurde, einerseits die Hautbelastung und die große Gefahr einer Schädigung derselben bei Anwendung einer größeren Tiefendosis zu vermindern, wenn nicht ganz auszuschalten, andererseits durch Erreichung einer geringeren Hautbelastung bei der Tiefenbestrahlung am Krankheitsherd größere Dosen zur Wirkung zu bringen. Durch die Rotations- bzw. Pendelbestrahlung ist es gelungen, wie es durch kein anderes Verfahren bisher möglich war, eine Konzentrierung der Dosis am Krankheitsherd zu erreichen bei gleichzeitiger Herabsetzung der Dosis für die Haut und die oberflächlichen Schichten.

Das wirksame Prinzip beruht darauf, daß während einer Bestrahlung — sei es durch Drehung des Patienten bei stehender Röhre oder durch Rotation einer Röhre um einen fixierten Patienten — der Krankheitsherd andauernd im Strahlenkegel liegt, während die Haut und das über dem Tumor befindliche Gewebe — mit von der Oberfläche nach der Tiefe abnehmender Geschwindigkeit — durch den Strahlenkegel hindurchwandert und deshalb nur einen Bruchteil der Gesamtumlaufzeit im Strahlenbereich verweilt. So erhält der Krankheitsherd ein Maximum, die Körperoberfläche dagegen ein Minimum an Strahlung.

Nachdem über diese Gedanken und Versuche hinaus die Rotationsbestrahlung soweit gediehen war, daß brauchbare Apparate und Bestrahlungsanlagen geschaffen wurden, mit denen therapeutische Bestrahlungen ausgeführt werden konnten, war es nicht nur von größtem wissenschaftlichem Interesse, sondern vor allem im Interesse des Patienten und Arztes notwendig, über die Dosisverteilung im Körper und auf dem Körper Genaueres zu erfahren. Es sind dazu zwei Möglichkeiten vorhanden. Einmal läßt sie

sich auf rechnerischem Wege erfassen unter Zuhilfenahme mathematischer und physikalischer Grundgesetze und unter Annahme vereinfachter und idealer Verhältnisse, indem man beispielsweise annimmt, der bestrahlte Körper habe die Form eines Kreiszylinders. Man gelangt so zu den Grundlagen der Dosisverteilung bei der Rotations- bzw. Pendelbestrahlung.

Du Mesnil de Rochemont[15]) gibt in einer Arbeit über „Die Dosierungsgrundlagen der Rotationsbestrahlung" eine Zusammenstellung der notwendigen mathematischen Formeln und Zusammenhänge. Mit Hilfe dieser Formeln und bekannter Kurven für feststehende Felder errechnet er die Verläufe von Dosenkurven, wie sie bei der Rotationsbestrahlung auftreten bzw. vermutet wurden.

Die andere Art, zu genauen Kenntnissen der Dosisverteilung und zu Bestrahlungsgrundlagen zu kommen, ist das Experiment, die Messung am Phantom. Sie wurde durchgeführt von Dessauer, Lion und Gökmen[11]), Bender-Kohler[6])[16]), Nakaidzumi und Miyakawa[13]).

Eine Verbindung beider Methoden, sowohl der rein berechnenden als auch der experimentellen, ist notwendig, um eine möglichst umfassende und genaue Anschauung der Dosenverteilung zu erhalten. Die experimentellen Messungen bestätigen die Richtigkeit unserer Berechnungen oder zeigen durch Abweichungen etwaige Mängel in unseren Berechnungen an. Die Berechnungen andererseits geben uns wichtige Grundlagen für das experimentelle Arbeiten. Daß es auch Fälle gibt, in denen die Ergebnisse des Experiments am Phantom von denen der reinen Berechnung nicht unwesentlich abweichen, zeigen die nachgenannten Arbeiten. Es bleibt auch immer zu bedenken, daß für unsere Berechnungen vereinfachte und ideale Verhältnisse zugrunde gelegt werden müssen, um zu einer eindeutigen und klaren Aussage zu gelangen, welche eine Norm darstellt, von der ausgegangen werden kann, um Berechnungen für den menschlichen Körper mit seiner stets variierten Form zu versuchen. Das Phantom und seine Messungen können den Verhältnissen des menschlichen Körpers oder eines Körperteiles weitgehend unterworfen und nachgebildet werden. Welche Bedeutung dadurch die Phantommessung in einzelnen Fällen erlangt, können nachfolgende Ausführungen zeigen.

In einer neueren Arbeit von Nakaidzumi und Miyakawa[17]) über räumliche Dosisverteilung der Röntgenstrahlen bei Rotationsbestrahlung am Phantom wird berichtet, daß mit einer Zunahme der Strahlenhärte nicht im selben Maße eine Zunahme der prozentualen Tiefendosis einhergeht, wie sie nach den Erfahrungen bei still stehendem Bestrahlungsfeld erwartet wird. Als Grund dafür wird angegeben, daß bei Rotationsbestrahlung mit zunehmender Strahlenhärte auch die Streuung im Phantom zunimmt und die Oberflächendosis der Gegenseite ebenfalls vermehrt wird. Wir werden durch diese Feststellungen am Phantom zum ersten Mal praktisch auf die Bedeutung der Streuzusatzstrahlung für die Rotationsbestrahlung hingewiesen, nachdem Du Mesnil de Rochemont[15]) schon in seinen theoretischen Auseinandersetzungen darauf aufmerksam machte, daß bei der Rotationsbestrahlung veränderte Streuzusatzverhältnisse zu erwarten seien.

Du Mesnil de Rochemont[18]) beschäftigte sich in einer weiteren Arbeit mit der ausführlichen Berechnung der Dosenverteilung unter Zugrundelegung der von Nakaidzumi und Miyakawa[17]) am Phantom angewandten Versuchsbedingungen und der dabei gefundenen Ergebnisse. Er fand dabei ebenfalls, daß durch eine zusätzliche Streustrahlung bei der Rotationsbestrahlung die Oberflächendosis deutlich erhöht wird, und daß dies zu der von Nakaidzumi und Miyakawa[17]) festgestellten Beeinträchtigung der Tiefenwirkung führte. Er sah diese Tatsache besonders eindrucksvoll in Erscheinung treten bei geringer Feldbreite und gab als Grund dafür an, daß hier der „Streustrahlenmantel" gegenüber dem „Primärstrahlenkegel" einen verhältnismäßig hohen Prozentsatz an Breite und Intensität verkörpert. Nakaidzumi und Miyakawa[17]) verwendeten Feldbreiten, die von Blenden im Abstand 10 cm von der Körperoberfläche auf dieselbe entworfen wurden. Die Blendenbreite betrug 1—5 cm jeweils um 1 cm ansteigend. Du Mesnil de Rochemont[18]) errechnete für diese Felder mit zunehmender Feldbreite ein Abnehmen des Einflusses der Streuzusatzstrahlung auf die Tiefenwirkung. Er meint, daß diese Tatsache insofern günstig sei, als in der Therapie größere Felder als hier im Versuch verwendet würden. Abschlie-

ßend stellt er dann fest, daß die hier aufgeworfene Frage durch weitere Messungen geklärt werden müsse.

Auch in einer gegenwärtig im Druck befindlichen Arbeit von Bender-Kohler[16]), die eine Fortsetzung der vorläufigen Mitteilung „Über Messungen bei der Pendelbestrahlung“ [6]) darstellt, wird auf die Streuzusatzstrahlung besonders hingewiesen. Es wurde bei Messungen am Phantom festgestellt, daß die auch bei der Pendelbestrahlung auftretende Streuzusatzstrahlung teilweise nicht unerhebliche Werte erreicht. Ferner wird in der Arbeit mitgeteilt, daß allem Anschein nach auch die Körper- bzw. Phantomform eine mehr oder weniger große Rolle für das Ausmaß der Streuzusatzstrahlung spielt, und es wird deshalb angeregt, dieselbe für die gebräuchlichsten Körperformen am Phantom zu untersuchen und zusammenzustellen.

Wie die genannten Arbeiten zeigen, stellt die Streuzusatzstrahlung bei der Rotations- und Pendelbestrahlung einen Faktor dar, der bei experimenteller Dosisbestimmung an Phantomen in Erscheinung tritt, aber durch bloße Berechnung in seiner Größe nicht bestimmt werden kann. Die Oberflächendosis wird dadurch erhöht und die Hautbelastung wird größer, als ursprünglich durch die Berechnungen angenommen wurde. Dadurch wird auch die Tiefenwirkung beeinträchtigt. Es ist deswegen von größtem Interesse, genaue Kenntnis von der Größe dieser Streuzusatzstrahlung unter den verschiedensten Verhältnissen und Bedingungen zu erhalten.

Messung der Streuzusatzstrahlung bei der Pendelbestrahlung.

Meine Aufgabe war es nun, an Phantommessungen die Abhängigkeit dieser Streuzusatzstrahlung von der Feldbreite bei der Pendelbestrahlung zu untersuchen.

I. Versuchsanordnung.

Die Phantome, welche die klarsten und eindeutigsten Verhältnisse für Versuche bieten, sind diejenigen von Zylinderform mit kreisförmigem Grundriß, so wie sie von Nakaidzumi und Miyakawa[17]) zu ihren Phantommessungen bei Rotationsbestrah-

lung verwendet wurden. Bei meinen Messungen habe ich bewußt von solch regelmäßiger Form der Phantome Abstand genommen, um die Messungen an möglichst getreuen Nachbildungen des menschlichen Körpers vorzunehmen. Ich bin dabei dem Beispiel von Bender-Kohler [16]) [6]) u. Dessauer, Lion und Gökmen [11]) gefolgt, die für ihre Messungen bei der Pendelbestrahlung auch Phantome benützt haben, die von der Kreiszylinderform zugunsten der Körperform abwichen. Es ergeben sich dadurch verschiedene Schwierigkeiten und Vorteile, auf die ich später eingehen möchte.

Zu den Messungen verwendete ich zwei Nachbildungen, ein Beckenphantom aus Paraffin gegossen und ein Oberschenkelphantom, dessen Wandung — nicht ganz der Dicke der menschlichen Haut entsprechend — aus dünnem, biegsamem Sperrholz gefertigt war. Den Boden und Verschluß dieses Zylinders mit ovalem Grundriß bildeten zwei Pappdeckelscheiben, die mit Leukoplast schmal befestigt waren. Der Zylinder selbst war mit Reis ausgefüllt. Reis und Paraffin geben strahlenmäßig ähnliche Bedingungen wie Wasser, aus dem ja zu 75—80 % der menschliche Muskel besteht. Mit Wasser als Phantomfüllung zu arbeiten wäre sehr schwierig, da dann Phantome mit Wandungen verwendet werden müßten, die wasserdicht und gleichzeitig einigermaßen stabil wären, wie beispielsweise dickeres Eisenblech, was die Messungen beeinflussen und verändern würde. Die beiden Phantome waren jeweils Querschnitte durch die genannte Körpergegend. Das Beckenphantom hatte eine Länge von 13,5 cm, das Oberschenkelphantom eine solche von 20,5 cm. Die weiteren Maße der beiden Phantome sind aus Abb. 1 und 2 zu ersehen.

Zur Bestrahlung lagerte ich mein Phantom auf einem Operationstisch, der nach allen Richtungen beweglich war und so die beste Einstellmöglichkeit bot. Um über die Dauer der verschiedenen Versuche die Phantome immer möglichst gleich einzustellen, legte ich an denselben Richtungsmarken an und stellte nach diesen jedesmal mit Wasserwaage und Senkblei aufs genaueste unter der Röhre ein. Zur Veranschaulichung möge die Abbildung 1 dienen.

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch die Röntgenröhre im Focus und durch das Oberschenkelphantom. Zwei dick aus-

gezogene Halbkreise deuten an, wie sich die Röhre bei einer Pendelung über dem Phantom bewegt. Der äußere große Halbkreis gibt den Weg des Focus an und damit den Focushautabstand FHA = 60 cm. Der innerste kleine Halbkreis zeigt den Abstand der Blende BHA = 24,5 cm von der Phantomoberfläche. Man erkennt, daß der Blenden-Hautabstand und damit FHA ganz geringfügig nach den Seiten hin abnimmt, was weiter ohne Bedeutung bleibt. Ein durch dünne Striche angegebener Halbkreis gibt für die beiden Rahmenrohre, auf denen die Röntgenröhre im Pendelgeräht ruht und auf denen sie senkrecht zur Bildebene über dem Phantom verschiebbar ist, an, wie sich ihr Mittelpunkt während der Pendelung bewegt.

Abbildung 2 gibt einen Querschnitt durch das Beckenphantom wieder. Der Halbkreis über demselben wird während einer Pendelung von der Blende der Röntgenröhre beschrieben. Für je 10 Grad des Pendelwinkels ist der Abstand Blende-Oberfläche eingetragen. Man sieht dabei deutlich, wie durch die Phantomform hier dieser Abstand und damit auch der Focus-Hautabstand nach den Seiten zu erheblich abnimmt.

Zur Pendelbestrahlung verwendete ich das Pendelgerät nach Kohler[12]) [6]) und als Röntgenapparatur eine Stabilivoltanlage der Siemens-Reiniger Werke. Durch eine sinnreiche Konstruktion war es ein Leichtes, die gewünschte Pendeltiefe für einen angenommenen Tumor am Pendelgerät einzustellen. Überdies konnte ich durch Einschalten einer Lichtquelle das eingestellte Pendelzentrum durch ein Strahlenkreuz sichtbar machen und zur Kontrolle am Phantom selbst nachmessen, ob die wirkliche Pendeltiefe der eingestellten auch entsprach. Der Focus-Haut-Abstand blieb dabei konstant 60 cm. Der Blenden-Haut-Abstand betrug 24,5 cm. Durch eine indirekte Lichtquelle, die sich hinter der Blende der Röntgenröhre virtuell im Focus befand, war es möglich, jede Feldgröße mit vier kulissenartigen Blenden herzustellen und im verdunkelten Raume direkt auf dem Phantom mit dem Meßband auszumessen. Dies trug sehr zur Genauigkeit der Feldereinstellung bei. Aber auch während der Pendelung selbst konnte ich vom Schalttisch aus das Bestrahlungsfeld sichtbar machen und im dunklen Raume seinen jeweiligen Stand und sein Weiterwandern über das Phantom und das dort liegende Meßgerät verfolgen.

Gependelt wurde über einen Winkel von 180°. Am Pendelgerät befand sich eine Winkeleinteilung von 0° bis 360°, über welcher an einem Faden ein Senkblei frei beweglich angehängt war. Dadurch war es möglich, den Winkel abzulesen, den das Pendelgerät und damit der Zentralstrahl in jeder Phase einer Pendelung mit der Waagerechten bildete (den Einfallswinkel). Gependelt wurde von links nach rechts (180°—0°) und umgekehrt (0°—180°). Die Zeit für eine Pendelung über einen Winkel von 180° betrug genau 27 Minuten.

Als Meßgerät diente ein Hammerdosimeter der Physikalisch-Technischen Werkstätten Freiburg i. B.[19]). Es besteht aus einer fingerhutförmigen Ionisationskammer mit einem Durchmesser von 18 mm, die auf einer Metallhülse sitzt. Durch Röntgenstrahlen wird in der Ionisationskammer ein schwacher elektrischer Strom erzeugt, welcher über ein elektrometrisches Relais in Form von Stromstößen zu einem Anzeigegerät durch Kabelleitung weitergegeben wird. Das Relais besteht aus einem kleinen Elektrometer, das bei Erreichung einer bestimmten Spannung durch Schließung eines Kontaktes einen Stromstoß abgibt. Jeder solche Stromstoß, der vom Anzeigegerät mit einem vernehmlichen Knacken angezeigt wird, entspricht einer Dosis von 5 r. Durch ein Zählwerk werden diese Stromstöße mitgezählt und auf einem Zifferblatt durch einen Zeiger die jeweils gezählte r-Dosis angegeben[19]).

Mit Hilfe eines Stativs wurde das Dosimeter auf der Oberfläche der Phantome so eingestellt, daß es der Oberfläche so dicht wie möglich anlag, und daß die Ionisationskammer genau in die Mitte des jeweils gewählten Feldes zu liegen kam. Wenn die Einstellung richtig war, mußte der Zentralstrahl der Röntgenröhre bei einer Einstellung derselben von 90° zur Waagerechten genau die Mitte der Ionisationskammer treffen. Vor Beginn einer jeden Messung wurde das Dosimeter entladen, um nicht aus früheren Verwendungen noch vorhandene Ladungen fälschlicherweise in die Versuche mitzubekommen.

II. Grundlagen und Fragen der Berechnung.

Die Versuche und Messungen wurden unter den folgenden konstanten Bedingungen vorgenommen:

1. Die Strahlung der Röntgenröhre war charakterisiert durch die Werte:
   kV = 190
   mA = 15
   HWS = 1,25 mm Cu
2. Die Pendelung:
   Der Pendelwinkel betrug 180°.
   Die Gesamtumlaufzeit für eine Pendelung war 27 Minuten.
3. Die Abstände waren:
   a) beim Oberschenkelphantom
      Pendeltiefe = Abstand Oberfläche-Pendelzentrum = 9 cm
      Focus-Hautabstand = 60 cm
      Focus-Pendelzentrum = 69 cm
   b) beim Beckenphantom
      Pendeltiefe = Abstand Oberfläche-Pendelzentrum = 11 cm
      Focus-Hautabstand = 60 cm
      Focus-Pendelzentrum = 71 cm.

Die Feldbreite an beiden Phantomen betrug nach einander 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm. Die Feldlänge war konstant 10 cm. Die benützten Feldgrößen waren also 2/10, 4/10, 6/10, 8/10, 10/10 cm.

Um von einer zusätzlichen Strahlung sprechen zu können, muß man wissen, wie groß ursprünglich die Strahlung ohne diesen Zusatz ist. Du Mesnil de Rochemont [15]) [22]) gibt uns, wie eingangs erwähnt, Grundlagen zur Errechnung der Dosisverteilung bei der Rotationsbestrahlung, die auch — wenig abgeändert — Geltung für die Pendelbestrahlung haben. Ausschlaggebend für die Dosis, die ein Punkt der Haut bei der Rotations- bzw. Pendelbestrahlung erhält, ist der Bestrahlungszeitunterschied zwischen der Oberfläche und dem Krankheitsherd in der Tiefe.

Um übersichtliche und möglichst allgemein gültige Ergebnisse und Bedingungen zu haben, wurde, wie ich schon erwähnte, für die Berechnungen von einem Phantom mit kreisförmigem Querschnitt ausgegangen.

Man kann auf zwei Arten die Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche während der Rotations- oder Pendelbestrahlung berechnen.

1. Das von der Röntgenröhre bestrahlte Hautfeld hat eine

bestimmte Feldbreite, die als Kreisbogen f (in Abb. 3 der Kreisbogen DSD_1) einen bestimmten Teil des Gesamtumfangs eines Kreises darstellt. Da jeder Punkt der Kreisoberfläche solange bestrahlt wird, als der Strahlenkegel mit der Breite des Kreisbogens f über ihn hinwegwandert, so wird er über eine Zeitdauer bestrahlt, die sich zur Gesamtumlaufzeit verhält, wie der Kreisbogen f zum Gesamtumfang des Kreises. Er wird also über den in dem Ausdruck $\frac{\text{Kreisbogen f}}{\text{Kreisumfang}} = \frac{f}{2\pi r}$ genau festgelegten Teil der Gesamtumlaufzeit bestrahlt.

Wie ich nachträglich sehe, hat schon Dessauer, Lion und Gökmen [11]) in einer Veröffentlichung diesen Ausdruck angegeben.

Die Bestrahlungszeit eines Punktes der Oberfläche beträgt danach also:

a) Bei der Rotationsbestrahlung über den Winkel 360^0
$= \frac{f}{2\pi R}$ der Gesamtumlaufzeit.
In Prozent ausgedrückt: $\frac{f \cdot 100}{2\pi R}$ % der Gesamtumlaufzeit.

b) Bei der Pendelbestrahlung über den Winkel 180^0
$= \frac{f}{\pi R}$ der Gesamtumlaufzeit.
In Prozent ausgedrückt: $\frac{f \cdot 100}{\pi R}$ % der Gesamtumlaufzeit.

c) Bei der Pendelbestrahlung über den Winkel x^0
$= \frac{f \cdot 360}{2\pi R \cdot x}$ der Gesamtumlaufzeit.
In Prozent ausgedrückt: $\frac{f \cdot 360 \cdot 100}{2\pi R \cdot x}$ % der Gesamtumlaufzeit.
Dabei ist R = der Kreisradius bzw. der Abstand Oberfläche-Rotationsmittelpunkt bzw. Oberfläche-Pendelzentrum.

Mit der angegebenen Berechnungsart ist es nur möglich, die Belichtungsdauer eines Punktes auf der Oberfläche durch eintretende, nicht aber durch rückwärts aus dem Körper wieder austretende Strahlen zu erfassen, was für die Pendelbestrahlung bis zu einem Winkel von 180^0 durchaus genügt, wie im Nachfolgenden noch näher ausgeführt wird.

2. Die andere Methode, die von Du Mesnil de Rochemont [15]) angegeben wurde, geht für die Berechnung der Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche nicht vom Kreisumfang, sondern von den zum Kreisumfang gehörenden Winkeln aus.

Bevor ich aber näher auf diese Berechnung eingehe, muß ich noch ein anderes Problem erwähnen. Bei jeder Bestrahlung wird die Haut bzw. die Phantomoberfläche nicht nur von den in den Körper eintretenden Strahlen getroffen, sondern auch — auf der der Röhre abgewandten Seite wieder — von den aus dem Körper austretenden Strahlen. Bei der Rotationsbestrahlung wird durch letztere Strahlen die Hautdosis etwas erhöht, da nach Durchlaufen eines Halbkreises — sei es durch Rotation des Patienten oder Kreisen der Röhre um denselben — diejenige Kreisoberfläche, die zunächst auf der der Röhre abgewandten Seite austretende Strahlung bekam, nun noch dazu eintretende Strahlung bekommt, nachdem die Röhre sich ihr zugewendet hat, und umgekehrt. Bei der Pendelbestrahlung über einen Winkel von 180^0 und weniger kann die aus dem Körper durch die Oberfläche wieder austretende und durch die Absorption stark abgeschwächte Strahlung vernachlässigt werden, da in diesem Fall eine nachträgliche Überlagerung der ein- und austretenden Strahlung nicht stattfindet. Selbst bei der Rotationsbestrahlung spielt die dadurch bedingte Erhöhung der Oberflächendosis eine geringe Rolle, wie Du Mesnil de Rochemont [18]) feststellt. Mit der Berechnung nach Du Mesnil de Rochemont [15]) ist es aber möglich, die Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche, sowohl durch eintretende als durch austretende Strahlen festzustellen. Da für die Pendelbestrahlung nur die Oberflächendosis, die durch die eintretenden Strahlen verabfolgt wird, Bedeutung erlangt, ist bei der Darstellung der Du Mesnil de Rochemont'schen Berechnung im Folgenden nur auf diese Rücksicht genommen.

Die Berechnung des Belichtungszeitunterschiedes zwischen Oberfläche und Herd gestaltet sich nach Du Mesnil de Rochemont [15]) folgendermaßen. Wenn ich die beiden Schnittpunkte der Randstrahlen meines Strahlenkegels mit der Phantom- oder Körperoberfläche (hier mit dem Kreis) mit dem Kreismittelpunkt

verbinde, so erhalte ich einen Kreissektor mit bestimmtem Winkel an der Spitze, der nach Du Mesnil de Rochemont[15]) 2γ heißt, da er für die Berechnungen den halben Winkel, also γ verwendet (s. Abb. 3). Der Winkel γ ist ausschlaggebend dafür, wie lange ein Punkt der Oberfläche im Bereich der in den Körper eintretenden Strahlung verweilt. Wenn ich diesen Winkel γ zu dem Gesamtumlaufwinkel in Beziehung setze, so erhalte ich einen Bruch, der mir den Teil der Gesamtumlaufzeit angibt, während deren sich ein Punkt der Oberfläche auf der der Röhre zugewandten Seite im Strahlenbereich befindet.

Die Bestrahlungszeit eines Punktes der Oberfläche durch Strahlen, die in den Körper eintreten, beträgt also:

a) Bei der Rotationsbestrahlung über den Winkel 360°

$= \frac{2\gamma}{360} = \frac{\gamma}{180}$ der Gesamtumlaufzeit.

In Prozent ausgedrückt:

$= \frac{\gamma \cdot 100}{180}$ % $= \frac{\gamma}{1{,}8}$ % der Gesamtumlaufzeit.

b) Bei der Pendelbestrahlung über den Winkel 180°

$= \frac{2\gamma}{180} = \frac{\gamma}{90}$ der Gesamtumlaufzeit.

In Prozent ausgedrückt:

$= \frac{\gamma \cdot 100}{90} = \frac{\gamma}{0{,}9}$ % der Gesamtumlaufzeit.

c) Bei der Pendelbestrahlung über den Winkel x°

$= \frac{2\gamma}{x}$ der Gesamtumlaufzeit.

In Prozent ausgedrückt:

$= \frac{2\gamma \cdot 100}{x}$ % $= \frac{200\gamma}{x}$ % der Gesamtumlaufzeit.

Den Winkel γ errechnet Du Mesnil de Rochemont[15]) dadurch, daß er ihn in Beziehung zu bekannten Größen setzt (siehe Abb. 3).

Es ist Winkel $\gamma = 180^0 - \beta - \alpha$ als Winkel eines Dreiecks.

Winkel $\beta = 180^0 - \delta$ als Nebenwinkel. Daraus ergibt sich Winkel $\gamma = 180^0 - 180^0 + \delta - \alpha$

$= \delta - \alpha$.

Um γ zu finden, muß ich zunächst Winkel δ und Winkel α kennen.

Für den Winkel α, wie Du Mesnil de Rochemont[15]) den halben Öffnungswinkel des Strahlenkegels nennt, kenne ich die Tangens- bzw. Sinusfunktion, was bei schmalen Strahlenkegeln praktisch dasselbe ist.

$$\sin \alpha = \frac{\text{halbe Feldbreite}}{\text{Focushautabstand}} = \frac{f}{2e} \text{ oder}$$

$$\sin \alpha = \frac{r}{E} \text{ d. h. } r = E \cdot \sin \alpha.$$

$$\sin \delta = \frac{r}{R} \text{ oder, da } r = E \cdot \sin \alpha, \text{ so ist}$$

$$\sin \delta = \frac{E \cdot \sin \alpha}{R}, \text{ worin } \sin \alpha \text{ als } \frac{f}{2e} \text{ und}$$

$E = e + R$ bekannt sind.

In der Berechnung ist:

r = der halbe Durchmesser des kreisförmig angenommenen Tumors in der Tiefe.

R = der Abstand Oberfläche-Rotationsmittelpunkt bzw. Oberfläche-Pendelzentrum.

E = der Abstand Focus-Rotationsmittelpunkt bzw. Focus-Pendelzentrum.

e = Focus-Haut-Abstand.

f = Feldbreite.

Diese Berechnungsgrundlagen für die Rotationsbestrahlung von Du Mesnil de Rochemont[15]) benützte ich zunächst für die rechnerische Bearbeitung meiner Versuche am Phantom, für die Pendelbestrahlung über einen Winkel von 180° so abgeändert, wie unter b) auf Seite 22 angegeben. Da meine Berechnungen aber am Oberschenkelphantom besonders für die großen Feldbreiten nicht stimmen konnten, gelangte ich durch die nachfolgenden Überlegungen zu einer anderen Methode, den Winkel 2γ zu errechnen. Ich möchte diesen anders berechneten Winkel als Winkel ε bezeichnen, zunächst weil er sich trotz Annahme derselben Feldbreite von dem nach Du Mesnil de Rochemont[15]) berechneten Winkel 2γ in seiner Größe unterscheidet, und dann, um den Winkel klar als einen einzigen zu kennzeichnen.

Ich habe bei meinen Versuchen die Feldbreite mit einem Meßband auf der Phantomoberfläche unmittelbar abgemessen, um ein Hautfeld von genauen Maßen zu gewährleisten. Meine Feldbreite f entspricht einem Kreisbogen f. Wenn ich dessen Endpunkte mit dem Kreismittelpunkt M verbinde, so erhalte ich einen Kreissektor mit dem Winkel ε an der Spitze (siehe Abb. 3 u. 6), der wie der Winkel 2γ ausschlaggebend dafür ist, wie lange ein Punkt der Oberfläche im Strahlenbereich der in den Körper eintretenden Strahlen verbleibt.

Du Mesnil de Rochemont[15]) legt für seine Berechnungen eine andere Art der Feldbreitenabmessung zugrunde, indem er für seine Berechnungen nicht von einer auf der Phantomoberfläche abgemessenen Feldbreite ausgeht, sondern die Feldbreite auf einer zum Zentralstrahl FSM senkrechten Tangente t des Kreises (der, wie erwähnt, aus Gründen der Einfachheit und Übersichtlichkeit als Querschnitt des Phantoms angenommen wird) abgemessen annimmt (s. Abb. 3).

Wenn ich die Feldbreite auf dem Phantom direkt abmesse und nach Du Mesnil de Rochemont[15]) den Winkel 2γ errechne und damit die weiteren Berechnungen durchführe, so berechne ich in Wirklichkeit ein Feld, das breiter ist als mein direkt abgemessenes, wie Abb. 3 zeigt. Dort gehört zu der von Du Mesnil de Rochemont[15]) für die Berechnung angenommenen Feldbreite ASA_1 auf der Tangente t in Wirklichkeit die auf die Kreisoberfläche projizierte Feldbreite CSC_1. Während der Kreisbogen DSD_1 die von mir tatsächlich abgemessene und bei den Phantomversuchen angewandte Feldbreite zeigt. BSB_1 gibt zum Vergleich die von Du Mesnil de Rochemont[15]) wirklich für die Berechnungen zugrundegelegte Feldbreite wieder, von der Kreisoberfläche zum Vergleich mit der von ihm angenommenen Feldbreite zurückgetragen auf die Tangente t.

Man ersieht daraus, daß sich so in allem für die Berechnungen größere Werte ergeben, als bei den Versuchen zugrunde gelegt waren. Die beiden schraffierten Winkel sind ein Maß für den Unterschied zwischen dem nach Du Mesnil de Rochemont[15]) berechneten Winkel 2γ und dem von mir berechneten Winkel ε. Dabei ist aber wichtigste Voraussetzung, daß der bestrahlte Kör-

per in seinem Querschnitt der Kreisform nahe steht, wie es z. B. beim Oberschenkel, Unterschenkel, Oberarm, Unterarm, Hals und mit Einschränkung beim Kopf der Fall ist.

Die Berechnung des Winkels ε.

Wie oben ausgeführt ist der Winkel ε zugehörig zu einem Kreissektor mit Kreisbogen f (= Feldbreite f) (s. Abb. 6). Die Berechnung des Winkels ε erfolgt ebenso wie die des Winkels 2γ dadurch, daß ich ihn in Beziehung zu bekannten Größen setze. Die Größe des Kreisbogens f ist bestimmt durch die Formel:

$$\text{Kreisbogen } f = \frac{\pi R \cdot \varepsilon}{180}; \text{ damit ist der}$$

$$\text{Winkel } \varepsilon = \frac{f \cdot 180}{\pi R}, \text{ wobei f als Feldbreite und R}$$

als Kreisradius (bzw. Pendeltiefe) bekannte Größen sind.

Die Bestrahlungszeit eines Punktes der Oberfläche durch Strahlen, die in den Körper eintreten, läßt sich nach den unter a) bis c) auf Seite 22 angegebenen Formeln berechnen, nur ist anstatt 2γ der Winkel ε und anstatt γ der Winkel $\frac{\varepsilon}{2}$ einzusetzen.

Für die Pendelbestrahlung über den Winkel 180^0 beträgt die Bestrahlungszeit eines Punktes der Oberfläche also:

$$= \frac{\varepsilon}{180} \text{ der Gesamtumlaufzeit, oder in Prozent:}$$

$$= \frac{100\,\varepsilon}{180}\,\% = \frac{\varepsilon}{1{,}8}\,\% \text{ der Gesamtumlaufzeit.}$$

Wie sehr die Unterschiede der Ergebnisse bei Anwendung der verschiedenen Berechnungsarten am Oberschenkelphantom mit zunehmender Feldbreite anwachsen, zeigt Tabelle I für die berechnete Gesamtoberflächendosis, die ein Punkt der Oberfläche bei Pendelbestrahlung über den Winkel 180^0 und einer Pendelzeit von 27 Minuten bei dem für jedes Feld bestimmten r/min-Zufluß erhält.

Besonders deutliche Unterschiede zeigen die beiden letzten Feldbreiten, Unterschiede, die in ihrer Größe über den Fehlerbereich hinausgehen und deshalb berücksichtigt werden müssen.

Nach Erkenntnis dieser Tatsachen habe ich alle meine Berechnungen für das Oberschenkelphantom auf dem Winkel ε aufgebaut. Beim Beckenphantom benützte ich als Grundlage der Berechnungen den Winkel 2γ, da ich für die direkte Abmessung der Feldbreite auf dem Phantom fast ebene Flächen habe (s. Abb. 2), meine Feldbreite also nahezu auf der zum Zentralstrahl senkrechten Tangente an einen Kreis mit dem Radius der angewandten Pendeltiefe abmesse.

Tabelle I

Feldbreite	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
Für Winkel 2γ berechnete Oberflächendosis (nach de Rochemont)	45,5 r	97,5 r	153,5 r	222,5 r	301,0 r
Für Winkel ε berechnete Oberflächendosis	45,5 r	97,0 r	149,0 r	211,0 r	274,5 r

Durch Berechnung des Winkels 2γ oder des Winkels ε konnte für jede Feldbreite, Pendeltiefe und Umlaufzeit die Zeitdauer festgelegt werden, während deren ein Punkt der Oberfläche direkt bestrahlt wurde. Aus dem r/min-Zufluß und dieser Zeitdauer berechnete ich die Oberflächendosis für einen Punkt während einer Pendelbestrahlung. Der r/min-Zufluß für jedes Feld des Oberschenkel- und Beckenphantoms wurde in einer größeren Anzahl von Messungen festgestellt und daraus ein Mittelwert errechnet.

Wenn die Wirklichkeit dem entsprach, was durch Rechnung als Wert der Oberflächendosis gefunden wurde, so mußten die berechneten und die gemessenen Ergebnisse miteinander übereinstimmen. Daß diese Übereinstimmung nicht besteht, sondern die aus dem Versuch gewonnenen Ergebnisse größer sind als die berechneten, in Wirklichkeit also eine zusätzliche Strahlung vorhanden ist, haben ja schon Du Mesnil de Rochemont [18]) und Bender-Kohler [16]) festgestellt.

Es gibt zwei Wege, die Streuzusatzstrahlung bei der Pendelbestrahlung zu erfassen.

1. Ich lasse eine ganze Pendelung von 180° ablaufen und lese am Zählgerät des Hammerdosimeters die Gesamtdosis ab. Von dieser im Versuch gemessenen Zahl ziehe ich diejenige ab, die ich durch Rechnung gefunden habe. Der Rest ist die Streuzusatzstrahlung.

2. Jede Feldbreite hat ihren zugehörigen Winkel ε oder 2γ. Jeder Punkt der Oberfläche wird solange bestrahlt, als der Strahlenkegel mit dieser Feldbreite über ihn hinweggeht, d. h. der Winkel ε und 2γ hat damit eine bestimmte Bedeutung für jeden Punkt auf der Oberfläche. Wenn nämlich der Zentralstrahl des Strahlenkegels sich mit dem einen Schenkel des Winkels ε oder 2γ deckt, dann berührt der eine der beiden Randstrahlen gerade den betreffenden Punkt auf der Oberfläche. Der Punkt beginnt damit in den Bereich der direkten Bestrahlung zu kommen, in dem er solange bleibt, als der Zentralstrahl an Zeit benötigt, um den Winkel ε oder 2γ zu durchwandern.

Statt des Punktes befindet sich mein Dosimeter auf der Oberfläche, das, wenn keine Streuzusatzstrahlung auftreten würde, zum erstenmal bei „Berührung" durch den Randstrahl des Strahlenkegels eine Dosisangabe machen dürfte. Wie die Versuche zeigen, gibt das Dosimeter bis zu dem erwähnten Punkt — immer in Dosen zu 5r, durch Knacken und Mitzählen der Uhr am Zählgerät — eine ganze Anzahl r an, ohne von einer direkten Bestrahlung getroffen worden zu sein. Da das Dosimeter genau in der Mitte des Pendelwinkels 180°, also bei 90° auf dem Phantom liegt, bedeutet die Dosis, die das Dosimeter angibt, bis es von direkter Bestrahlung getroffen wird, die Streuzusatzstrahlung der einen Seite meines Phantoms. Es wandert nun der Strahlenkegel mit der jeweiligen Feldbreite über das Dosimeter hinweg und es liegt während einer für jede Feldbreite bestimmten Zeit unter direkter Bestrahlung. Dann kommt aber einmal der Augenblick, in welchem der Randstrahl des Strahlenkegels das Dosimeter auf der anderen Seite berührt und im Weiterwandern verläßt. Es beginnt von hier ab dann wieder ein Gebiet, aus dem nur mehr Streuzusatzstrahlung das

Meßgerät treffen kann, und ich erhalte den Streuzusatz der anderen Seite des Phantoms. Wie die Versuche weiter zeigen, entsprechen sich diese Streuzusatzstrahlungen der beiden Seiten bei einem einigermaßen symmetrischen Phantom und bei genauer Mittellage des Dosimeters auf demselben. Da ich an meinem Pendelgerät jederzeit den Neigungswinkel und damit den Einfallswinkel des Zentralstrahls ablesen kann, bin ich in der Lage die Winkel zu bestimmen, bei denen das Dosimeter jeweils eine Dosis von 5 r anzeigt. In dem Winkel ε bzw. 2γ kenne ich den Bereich, in dem das Meßgerät direkte Bestrahlung erhält, und kann deshalb die Streuzusatzstrahlung auch dadurch errechnen, daß ich die Dosisangaben zu je 5 r bis zum Beginn des Winkels ε bzw. 2γ auf jeder Seite addiere. Das Meßgerät liegt so auf der Phantomoberfläche, daß ein unter 90^0 zur Waagerechten einfallender Zentralstrahl es genau in der Mitte trifft. Die direkte Bestrahlung beginnt demnach bei dem Winkel $\left(90^0 + \frac{\varepsilon}{2}\right)$ bzw. $(90^0 + \gamma)$ und endet bei dem Winkel $\left(90^0 - \frac{\varepsilon}{2}\right)$ bzw. $(90^0 - \gamma)$.

Nun ist aber das Dosimeter gar kein Punkt, sondern eine Kammer von 18 mm Durchmesser. Der Randstrahl wird also früher berühren, als der Winkel ε oder 2γ für die betreffende Feldbreite und einen Punkt auf der Oberfläche angibt (s. Abb. 5). Der Winkel, unter dem die Berührung des Dosimeters durch den Randstrahl stattfindet, ist so groß, als gehörte er zu einem Feld, das um 18 mm breiter ist als das angenommene; von der Feldmitte aus also auf jeder Seite um 9 mm. Die Feldbreite nimmt in den Versuchen von einem Feld zum andern immer um 2 cm zu. Der Winkel ε, der zum Dosimeter gehört, entspricht deshalb eigentlich immer schon dem nächstgrößeren Feld, was ich bestätigt finde, wenn ich mit meinem durch die erwähnte Lichtquelle sichtbar gemachten Feld mein Pendelgerät so einstelle, daß nach einander auf beiden Seiten der Randstrahl das Dosimeter berührt, und am Pendelgerät den Winkel auf jeder Seite ablese. Ich darf also jeweils nur die bis zu diesem Winkel angegebene Dosis als Streuzusatzstrahlung ansprechen. Es entsteht dadurch für eine prozentuale Angabe der Ergebnisse

meiner Versuche kein Fehler, da die an Stelle eines Punktes verwendete 18 mm breite Kammer auch in Gestalt des r/min-Zuflusses in meine Berechnungen eingeht, da ich diesen ja auch mit der breiten Kammer und nicht mit einem punktförmigen Messinstrument messe. Es kommt also zu einer über alle Ergebnisse verteilten Veränderung der wirklichen Werte, was keine Bedeutung für prozentuale Angaben gewinnt, da für jedes Meßergebnis die Veränderung in derselben Proportion erfolgt*).

Man kann die Frage erheben, warum wurde mit dem Hammerdosimeter und nicht mit kleinen Kondensatorkammern gemessen, wie sie von Sievert [20]) und Zimmer [21]) angegeben wurden. Das geschah einmal, um genau zu erfahren, wie sich die Streuzusatzstrahlung über das Phantom während der Pendelbestrahlung verteilt, da das Dosimeter immer Dosen von 5 r anzeigt, und um diese Einzeldosen der Streuzusatzstrahlen zu addieren und mit der Differenz aus gemessener und errechneter Gesamtoberflächendosis zu vergleichen; zum anderen, weil es sich um Gesamtdosen handelte, die von einem kleinen Kondensator nicht mehr angegeben werden.

Wenn meine Überlegungen, Berechnungen und Messungen stimmten, dann mußten die Ergebnisse, die ich durch Errechnung der Streuzusatzstrahlung nach den beiden angegebenen Methoden erhielt, übereinstimmen, höchstens mit Abweichungen im Bereich der Fehlergrenzen.

III. Die Versuchsergebnisse.

a) **Am Oberschenkelphantom** (s. Abb. 1).

Für jede Feldbreite wurden 4 Pendelungen durchgemessen. Zwei davon wurden auf der rechten Seite (von $0^0 - 180^0$) und zwei auf der linken Seite (von $180^0 - 0^0$) begonnen.

Im Nachfolgenden möchte ich für jede Feldbreite eine von diesen 4 Pendelbestrahlungen wiedergeben. Ich muß zur Rechtfertigung dieser auszugsweisen Wiedergabe der Versuche hinzufügen und versichern, daß sich in keinem Fall die Ergebnisse

*) Ähnliche Betrachtungen wie ich hat unabhängig von mir M. Weber in seiner Inaugural-Dissertation, Mai 1940 gebracht.

der gemessenen Gesamtoberflächendosen um mehr als 5 r — was durchaus im Bereich der Fehlergrenzen liegt — für eine Feldbreite von einander unterschieden haben. Es kommt mir bei der Wiedergabe dieser einen Messung vor allem darauf an, für jedes Feld an einem Versuchsbeispiel zu zeigen, daß ich für meine Streuzusatzstrahlung fast dieselben Werte erhalte, wenn ich die berechnete Gesamtoberflächendosis von der gemessenen abziehe, und wenn ich sie direkt aus dem Versuch ableite. Weiterhin wollte ich zeigen, wie diese Ableitung im einzelnen Fall erfolgte. Von der gemessenen Oberflächendosis der 4 Pendelbestrahlungen pro Feldbreite wurde das Mittel gesucht und bei jedem Versuch angegeben.

Bei den Versuchen am Oberschenkelphantom blieben für alle Feldbreiten folgende Werte konstant:

Strahlung:	kV	= 190
	mA	= 15
	HWS	= 1,25 mm Cu
Pendeltiefe		= 9 cm
Focushautabstand		= 60 cm
Pendelwinkel		= 180°
Gesamtumlaufzeit		= 27 Minuten
Feldlänge		= 10 cm

Die Feldbreiten nahmen um 2 cm ansteigend von 2 cm auf 10 cm zu.

1. *Feld 2/10 cm = 20 cm².*

Winkel $\varepsilon = 12{,}73°$; Winkel $\frac{\varepsilon}{2} = 6{,}37°$.

Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 7,1 %
In Minuten = 1,92 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 23,71 beträgt die
berechnete Oberflächendosis = 45,5 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180°—117° = 5 r
2. 117°—100° = 5 r

} 10 r Streuzusatzstrahlung

(96,4°—83,6° = Winkel ε für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

102°— 78° = Winkel ε für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

3. 82°—69° = 5r
4. 69°— 6° = 5r
   6°— 0° = 0r

} 10r Streuzusatzstrahlung.

Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 67,5r
Berechnete Oberflächendosis	= 45,5r
Streuzusatzstrahlung	= 22,0r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 20,0r

2. *Feld 4/10 cm = 40 cm².*

Winkel $\varepsilon = 25{,}46°$; Winkel $\frac{\varepsilon}{2} = 12{,}73°$.

Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche in Prozent der Gesamtumlaufzeit	= 14,2 %
In Minuten	= 3,83 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 25,29 beträgt die berechnete Oberflächendosis	= 97,0r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180°—135° = 5r
2. 135°—114° = 5r
3. 114°—105° = 5r

} 15r Streuzusatzstrahlung

(102,7°—77,3° = Winkel ε für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

108° —72° = Winkel ε für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

4. 75,5°—69° = 5r
5. 69° —48° = 5r
6. 48° — 0° = 5r

} 15r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 125,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 97,0 r
Streuzusatzstrahlung	= 28,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 30,0 r

3. *Feld 6/10 cm = 60 cm².*

Winkel $\varepsilon = 38{,}2^0$; Winkel $\frac{\varepsilon}{2} = 19{,}1^0$.

Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche in Prozent der Gesamtumlaufzeit	= 21,22 %
In Minuten	= 5,73 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 26,02 beträgt die berechnete Oberflächendosis	= 149,0 r

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180^0—0^0.

1. 180^0—148^0 = 5 r
2. 148^0—126^0 = 5 r
3. 126^0—115^0 = 5 r

} 15 r Streuzusatzstrahlung

($109{,}1^0$—$70{,}9^0$ = Winkel ε für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

115^0 —65^0 = Winkel ε für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

4. 67^0—60^0 = 5 r
5. 60^0—39^0 = 5 r
6. 39^0— 5^0 = 5 r

} 15 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 180,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 149,0 r
Streuzusatzstrahlung	= 31,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 30,0 r

4. *Feld 8/10 cm = 80 cm².*

Winkel $\varepsilon = 50{,}94^0$; Winkel $\frac{\varepsilon}{2} = 25{,}47^0$.

Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 28,3 %
In Minuten = 7,64 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 27,6 beträgt die
berechnete Oberflächendosis = 211,0 r

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180°—162° = 5 r
2. 162°—145° = 5 r
3. 145°—132° = 5 r
4. 132°—122° = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

(115,5°—64,5° = Winkel ε für einen Punkt, ermittelt durch Berechnung)

121° —59° = Winkel ε für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

5. 61°—57° = 5 r
6. 57°—47° = 5 r
7. 47°—30° = 5 r
8. 30°—5° = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 255,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 211,0 r
Streuzusatzstrahlung	= 44,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 40,0 r

5. *Feld 10/10 cm = 100 cm².*

Winkel $\varepsilon = 63{,}67°$; Winkel $\frac{\varepsilon}{2} = 31{,}84°$.

Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 35,37 %
In Minuten = 9,54 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 28,79 beträgt die
berechnete Oberflächendosis = 274,5 r

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180^0—160^0 = 5 r
2. 160^0—144^0 = 5 r
3. 144^0—132^0 = 5 r
4. 132^0—125^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

(122^0—58^0 = Winkel ε für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

127^0—53^0 = Winkel ε für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

5. 53^0—45^0 = 5 r
6. 45^0—33^0 = 5 r
7. 33^0—19^0 = 5 r
8. 19^0—0^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 315,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 274,5 r
Streuzusatzstrahlung	= 40,5 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 40,0 r

Um eine übersichtliche Darstellung der Meßergebnisse am Oberschenkelphantom zu geben, habe ich sie in Tabelle II zusammengefaßt. Aus der Zusammenstellung ist auch ersichtlich, welchen Prozentsatz der berechneten Oberflächendosis die Streuzusatzstrahlung beim einzelnen Feld ausmacht, d. h. wieviel Prozent der berechneten Oberflächendosis noch zu dieser addiert werden müssen, um die wirkliche Oberflächendosis zu erhalten, die beispielsweise bei einer Bestrahlung einem Patienten verabfolgt wird. Um die Errechnung dieser wirklichen Oberflächendosis einfacher zu gestalten, wurde in einer weiteren Querreihe der Tabelle II angegeben, wie sich die gemessene Oberflächendosis prozentual zu der berechneten verhält.

Die in Tabelle II zusammengefaßten Ergebnisse der Pendelbestrahlung eines Oberschenkelphantoms zeigen zunächst, daß die gemessene Oberflächendosis sämtlicher Feldbreiten nicht unerheblich die berechnete Oberflächendosis übersteigt. Es bestätigt

sich die von Du Mesnil de Rochemont[18]) und Bender-Kohler[16]) gemachte Beobachtung, daß durch eine Streuzusatzstrahlung die berechnete Oberflächendosis erhöht wird. Die absolute Streuzusatzstrahlung nimmt an Größe mit der Feldbreite ständig zu bis zu dem Feld 8/10 cm, um plötzlich bei weiterer Zunahme der Feldbreite auf 10 cm wieder abzunehmen. Diese

Tabelle II

Feldbreite	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
Gemessene Oberflächendosis	67,5 r	125,0 r	180,0 r	255,0 r	315,0 r
Berechnete Oberflächendosis	45,5 r	97,0 r	149,0 r	211,0 r	274,5 r
Streuzusatzstrahlung (in r angegeben)	22,0 r	28,0 r	31,0 r	44,0 r	40,5 r
Streuzusatzstrahlung (in % der berechneten Oberflächendosis)	48,3 %	28,9 %	20,8 %	20,8 %	14,9 %
Gemessene Oberflächendosis in % der berechneten	148,3 %	128,9 %	120,8 %	120,8 %	114,9 %

Abnahme erklärt sich wohl daraus, daß für die Feldbreite von 10 cm der Winkel ε mit 63,67° schon über ein Drittel des gesamten Pendelwinkels ausmacht, und damit ein Punkt der Oberfläche über ein Drittel der Gesamtumlaufzeit im direkten Strahlenbereich liegt. Für das Dosimeter betrachtet, vergrößert sich der Winkel ε auf ungefähr 74°. Es ist klar, daß damit die seitlichen Partien, aus denen die Streuzusatzstrahlung kommt, immer kleiner werden, während die durch breitere Felder erzeugte Streuzusatzstrahlung nicht in demselben Maße größer wird, was dann von einer bestimmten Feldbreite an zu dem Kleinerwerden der Streuzusatzstrahlung führt.

Wie sich die Streuzusatzstrahlung bei zunehmender Feldbreite entwickelt, ersieht man am besten aus der Darstellung der Einzelversuche 1.—5. auf Seite 30—34. Dort ist jeweils für die Streu-

zusatzstrahlung angegeben, von welchem Winkelgrad bis zu welchem Winkelgrad das Dosimeter eine Dosis von 5 r anzeigte. Wenn ich nun für die fünf verschiedenen Feldbreiten den Winkelbereich betrachte, der von dem Pendelgerät für die ersten 5 r Streuzusatzstrahlung durchlaufen werden mußte, so erhalte ich folgendes Bild:

Für Feld 2/10: von 180^0—$117^0 = 63^0$ für 5 r.
Für Feld 4/10: von 180^0—$135^0 = 45^0$ für 5 r.
Für Feld 6/10: von 180^0—$148^0 = 32^0$ für 5 r.
Für Feld 8/10: von 180^0—$162^0 = 18^0$ für 5 r.
Für Feld 10/10: von 180^0—$160^0 = 20^0$ für 5 r.

Bis zur Feldbreite 8 cm wird der Winkelbereich für die ersten 5 r Streuzusatzstrahlung gleichmäßig kleiner, während von der Feldbreite 8 cm zur Feldbreite 10 cm keine Abnahme dieser Winkelgröße mehr erfolgt.

Wie die Tabelle II weiter zeigt, nimmt die Streuzusatzstrahlung am meisten von der Feldbreite 6 cm zur Feldbreite 8 cm zu.

Für die Praxis ist es vor allem wichtig zu wissen, um wieviel Prozent der Streuzusatz die für die einzelne Feldbreite berechnete Oberflächendosis erhöht. Auch darüber gibt die Übersicht der Tabelle II Aufschluß. Wir sehen, daß mit zunehmender Feldbreite die Streuzusatzstrahlung prozentual abnimmt. Auffallend ist dabei, daß bei der Feldbreite 6 cm und 8 cm die prozentuale Erhöhung der berechneten Oberflächendosis dieselbe ist. Aus Abb. 4 sieht man, wie die Kurve O im Bereich der kleinen Feldbreiten zunächst ziemlich steil abfällt, um nach dem erwähnten Gleichstand der Feldbreiten 6 cm und 8 cm gegen das 10 cm breite Feld hin wiederum, aber in geringerem Maße als bei den schmalen Feldern abzufallen. Es wird deutlich, daß die Erhöhung der Oberflächendosis durch Streuzusatzstrahlung und damit der verschlechternde Einfluß auf die Tiefenwirkung mit zunehmender Feldbreite geringer wird. Er ist aber auch bei der Feldbreite 10 cm noch so groß, daß er eine gewisse Rolle spielt und berücksichtigt werden muß.

In der Tabelle II sind in der dritten Reihe von oben die r-Werte der Streuzusatzstrahlung angegeben, so wie sie sich aus der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Oberflächendosis ergeben haben. Diese Werte wurden auch zu den

prozentualen Berechnungen herangezogen. Die aus den Versuchen direkt abgeleiteten Streuzusatzwerte wurden hier in der Darstellung nicht berücksichtigt, da ich sie für weniger genau halte als die angeführten Werte. Das Dosimeter gibt jeweils nur Dosen von 5 r an. Daher kam es, daß bei der direkten Ablesung der Streuzusatzstrahlung nicht immer genau bei dem Winkelgrad abgelesen werden konnte, der durch den Winkel ε für jede Feldbreite bestimmt war. So hatte das Dosimeter bei seiner letzten 5 r-Angabe die zum Streuzusatz gehörte, manchmal schon direkte Bestrahlung bekommen.

Trotzdem ist die Übereinstimmung der Ergebnisse der auf beide Arten bestimmten Streuzusatzstrahlung im Bereich der Fehlergrenzen auffallend groß (die Abweichung ist in keinem Fall größer als 10 %). Daß die eine Berechnungsart zur Kontrolle der andern nicht nur wertvoll sondern auch wichtig war, wurde dadurch erwiesen, daß ein Fehler beim Berechnen der Oberflächendosis dadurch ausgeschaltet werden konnte.

Wie erwähnt, hatte ich zunächst die Oberflächendosis für den Winkel 2γ nach Du Mesnil de Rochemont[15]) errechnet und Werte erhalten, wie sie in Tabelle I vermerkt sind. Als ich daraus meine Streuzusatzstrahlung ableitete, bekam ich für die großen

Tabelle III

Feldbreite	8 cm	10 cm
1. Gemessene Oberflächendosis	255,0 r	315,0 r
2. Für Winkel 2γ berechnete Oberflächendosis	222,5 r	301,0 r
Aus 1. und 2. abgeleitete Streuzusatzstrahlung	32,5 r	14,0 r
Direkt aus dem Versuch abgeleitete Streuzusatzstrahlung	40,0 r	40,0 r
3. Für Winkel ε berechnete Oberflächendosis	211,0 r	274,5 r
Aus 1. und 3. abgeleitete Streuzusatzstrahlung	44,0 r	40,5 r

Feldbreiten 8 cm und 10 cm Ergebnisse, die stark von den aus den Versuchen direkt abgeleiteten Ergebnissen abwichen (siehe Tabelle III). In einer Reihe von Nachversuchen für die Feldbreiten 8 cm und 10 cm fand ich immer wieder dieselben Ergebnisse und war sicher, daß kein Fehler unterlaufen war. Darauf ging ich nochmals die Grundlagen der Berechnung durch und kam zu den Überlegungen, die ich eingangs erwähnte, und die dann zur Richtigstellung der Berechnungen und Ergebnisse führten. Sie sind in Tabelle III zum Vergleich nochmals mitaufgeführt.

Damit ist gezeigt, daß sich für Körper mit kreisähnlichem Querschnitt und bei gleichzeitiger Abmessung der Feldbreite unmittelbar auf der Oberfläche die Berechnungen mit dem Winkel 2γ nach Du Mesnil de Rochemont[15]) nicht die richtigen Ergebnisse der Streuzusatzstrahlung finden lassen, was besonders bei breiten Feldern deutlich wird. Ich möchte mit dieser Feststellung die Berechnungsgrundlagen von Du Mesnil de Rochemont[15]) und ihre Bedeutung in keiner Weise herabsetzen, zumal ich sie bei dem Beckenphantom selbst gerne benützt habe. Ich wollte aber dennoch berichten, aus welchen Gründen ich sie unter den oben genannten Bedingungen nicht angewandt habe.

b) **Die Versuchsergebnise am Beckenphantom** (s. Abb. 2)

Wie bei den Versuchen mit dem Oberschenkelphantom, wurden auch hier für jede Feldbreite 4 Pendelungen durchgemessen, wobei zwei auf der rechten Seite (von 0^0—180^0) und zwei auf der linken Seite (von 180^0—0^0) begonnen wurden. Für jede Feldbreite möchte ich im Folgenden von den vier Pendelbestrahlungen und Messungen je eine anführen aus Gründen, die ich beim Versuch a (Seite 29) angegeben habe. Die angeführten Ergebnisse der gemessenen Oberflächendosis stellen jeweils den Mittelwert aus den 4 Messungen für jede Feldbreite dar.

Bei den Versuchen am Beckenphantom blieben für sämtliche Feldbreiten folgende Werte konstant:

	kV	= 190
Strahlung:	mA	= 15
	HWS	= 1,25 Cu
Pendeltiefe		= 11 cm

Focushautabstand	= 60 cm
Pendelwinkel	= 180°
Gesamtumlaufzeit	= 27 Minuten
Feldlänge	= 10 cm

Die Feldbreiten nahmen je um 2 cm ansteigend von 2 cm auf 10 cm zu.

1. *Feld 2/10 cm = 20 cm².*

Winkel $2\gamma = 10{,}44°$; Winkel $\gamma = 5{,}22°$.
Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 5,8 %
In Minuten = 1,57 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 24,49 beträgt die
berechnete Oberflächendosis = 38,5 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180°—113° = 5 r
2. 113°—98,5° = 5 r } 10 r Streuzusatzstrahlung

(95,2°—84,8° = Winkel 2γ für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

100,0°—80,0° = Winkel 2γ für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

3. 81,5°—62,5° = 5 r
4. 62,5°— 0° = 5 r } 10 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 60,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 38,5 r
Streuzusatzstrahlung	= 21,5 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 20,0 r

2. *Feld 4/10 cm = 40 cm².*

Winkel $2\gamma = 21{,}0°$; Winkel $\gamma = 10{,}5°$.
Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 11,7 %

In Minuten = 3,16 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 26,45 beträgt die berechnete Oberflächendosis = 83,5 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180°—0°.

1. 180°—130° = 5 r
2. 130°—110° = 5 r } 15 r Streuzusatzstrahlung
3. 110°—102° = 5 r

(100,5°—79,5° = Winkel 2γ für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

105° —75° = Winkel 2γ für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

4. 77°—68° = 5 r
5. 68°—47° = 5 r } 15 r Streuzusatzstrahlung
6. 47°—0° = 5 r

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 115,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 83,5 r
Streuzusatzstrahlung	= 31,5 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 30,0 r

3. *Feld 6/10 cm = 60 cm².*

Winkel $2\gamma = 32{,}0°$; Winkel $\gamma = 16{,}0°$.
Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 17,8 %
In Minuten = 4,8 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 27,27 beträgt die berechnete Oberflächendosis = 131,0 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 0°—180°.

1. 0° —41° = 5 r
2. 41° —59,5° = 5 r } 15 r Streuzusatzstrahlung
3. 59,5°—70° = 5 r

(74°—106° = Winkel 2γ für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

69^0—111^0 = Winkel 2γ für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

4. 111^0 —$121{,}5^0$ = 5 r
5. $121{,}5^0$ – 138^0 = 5 r
6. 138^0 —180^0 = 5 r

} 15 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 164,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 131,0 r
Streuzusatzstrahlung	= 33,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 30,0 r

4. *Feld 8/10 cm = 80 cm².*

Winkel $2\gamma = 43{,}0^0$; Winkel $\gamma = 21{,}5^0$.
Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 24,1 %
In Minuten = 6,5 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 27,8 beträgt
die berechnete Oberflächendosis = 181,0 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180^0—0^0.

1. 180^0 — 149^0 = 5 r
2. 149^0 — $131{,}5^0$ = 5 r
3. $131{,}5^0$— 120^0 = 5 r
4. 120^0 — 115^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

($111{,}7^0$—$68{,}3^0$ = Winkel 2γ für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

117^0 —63^0 = Winkel 2γ für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

5. 66^0—58^0 = 5 r
6. 58^0—46^0 = 5 r
7. 46^0—23^0 = 5 r
8. 23^0— 0^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 225,0 r
Berechnete Oberflächendosis	= 181,0 r
Streuzusatzstrahlung	= 44,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 40,0 r

5. *Feld 10/10 cm = 100 cm²*.

Winkel $2\gamma = 55{,}5^0$; Winkel $\gamma = 27{,}75^0$.
Bestrahlungszeit eines Punktes auf der Oberfläche
in Prozent der Gesamtumlaufzeit = 30,83 %
In Minuten = 8,3 Minuten
Bei einem r/min-Zufluß von 29,7 beträgt
die berechnete Oberflächendosis = 246,5 r.

Die Pendelbestrahlung: Pendelung von 180^0—0^0.

1. 180^0—157^0 = 5 r
2. 157^0—142^0 = 5 r
3. 142^0—131^0 = 5 r
4. 131^0—123^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

($117{,}75^0$—$62{,}25^0$ = Winkel 2γ für einen Punkt, ermittelt durch Rechnung)

124^0 —56^0 = Winkel 2γ für das Dosimeter, ermittelt am Pendelgerät } In diesem Winkelbereich erhält das Dosimeter direkte Bestrahlung

5. 61^0—54^0 = 5 r
6. 54^0—45^0 = 5 r
7. 45^0—30^0 = 5 r
8. 30^0—3^0 = 5 r

} 20 r Streuzusatzstrahlung

Die Streuzusatzstrahlung:

Im Versuch gemessene Oberflächendosis	= 282,5 r
Berechnete Oberflächendosis	= 246,5 r
Streuzusatzstrahlung	= 36,0 r
Nur aus dem Versuch abgeleitet beträgt die Streuzusatzstrahlung	= 40,0 r

Eine zusammenfassende Übersicht über die Messergebnisse am Beckenphantom, insbesondere der Streuzusatzstrahlung gibt die Tabelle IV.

Die Anordnung der Tabelle IV entspricht derjenigen der Tabelle II (Seite 35). Damit gelten die in Bezug auf die Zusammenstellung dort gemachten Ausführungen auch hier.

Wie auch aus diesen Ergebnissen am Beckenphantom hervorgeht, liegen die gemessenen Oberflächendosen über den berechneten und geben so eine Streuzusatzstrahlung an, die bis

Tabelle IV

Feldbreite	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
Gemessene Oberflächendosis	60,0 r	115,0 r	164,0 r	225,0 r	282,5 r
Berechnete Oberflächendosis	38,5 r	83,5 r	131,0 r	181,0 r	246,5 r
Streuzusatzstrahlung in r angegeben	21,5 r	31,5 r	33,0 r	44,0 r	36,0 r
Streuzusatzstrahlung in % der berechneten Oberflächendosis	55,0 %	37,7 %	25,2 %	24,3 %	14,6 %
Gemessene Oberflächendosis in % der berechneten	155,0 %	137,7 %	125,2 %	124,3 %	114,6 %

zur Feldbreite 8 cm in ihrer Größe ansteigt und dann wieder abnimmt. Die Gründe dafür wurden bei der Besprechung der Tabelle II in Erwägung gezogen. Die prozentuale Streuzusatzstrahlung nimmt mit zunehmender Feldbreite ab. Von Feldbreite 6 cm nach Feldbreite 8 cm ist diese Abnahme sehr gering. Auch bei den Versuchen am Beckenphantom zeigt sich also, daß der verschlechternde Einfluß der Streuzusatzstrahlung auf die Tiefenwirkung mit zunehmender Feldbreite nachläßt. Die Kurve B in Abb. 4 zeigt diese Abnahme für die einzelnen Feldbreiten.

Vergleich der Ergebnisse aus Tabelle II und IV.

Die berechneten Oberflächendosen für die beiden Versuchsreihen am Oberschenkel- und Beckenphantom unterscheiden sich für gleiche Feldbreiten insofern, als durch verschiedene Tiefe des Pendelzentrums und durch Anwendung verschiedener Berechnung für die beiden Phantome, auch die Winkel 2γ und ε verschieden sind. Aus denselben Gründen unterscheiden sich auch die gemessenen Oberflächendosen für beide Phantome.

Die Streuzusatzstrahlung (= der Unterschied zwischen gemessener und berechneter Oberflächendosis) ergibt bei beiden Phantomen Werte, die einander sehr ähnlich sind und sich nur in Grenzen unterscheiden, die noch im Bereich der Fehlermöglichkeiten liegen. Aber nicht nur für die einzelne Feldbreite findet man eine weitgehende Übereinstimmung, sondern auch für den Verlauf der ganzen Reihe. So entspricht sich in beiden Meßreihen eine Zunahme der Werte bis einschließlich Feldbreite 8 cm, wobei die stärkste Zunahme von 6—8 cm Feldbreite statthat, während die Streuzusatzstrahlung von Feldbreite 8 cm nach 10 cm abnimmt. Wenn man aber den prozentualen Streuzusatz der beiden Phantome vergleicht, so liegt derjenige des Beckenphantoms in allen Werten bis einschließlich Feldbreite 8 cm deutlich über den am Oberschenkelphantom gewonnenen Ergebnissen (s. Abb. 4). Nur die Werte für das 10 cm breite Feld sind nahezu gleich.

Man darf sich dabei aber nicht täuschen lassen, denn wenn ich auch am Beckenphantom Pendeltiefe 9 cm anstatt 11 cm anwenden würde, so wird der Winkel 2γ größer und damit wächst auch die gemessene und berechnete Oberflächendosis, während der Streuzusatz nicht zu-, sondern eher etwas abnimmt. Es nähern sich dann auch die prozentualen Streuzusatzwerte denen des Oberschenkelphantoms. Ich werde also beiden Versuchen am besten dadurch gerecht, daß ich die Mittelwerte bestimme (s. Abb. 4, Kurve M). Auffallend ist bei beiden Phantomen, daß der prozentuale Streuzusatz bei den Feldbreiten 6 cm und 8 cm die gleichen Werte erreicht, was anzeigt, daß hier die Breite und Intensität des Streustrahlenmantels nochmals ein relativ günstiges Verhältnis zur Breite und Intensität des Primärstrahlenkegels einnimmt.

Man würde annehmen, daß die Streuzusatzstrahlung beim Beckenphantom höhere Werte als beim Oberschenkelphantom erreicht, da der bestrahlte Körperquerschnitt wesentlich größer ist. Nach den Versuchen ist aber die Streuzusatzstrahlung in beiden Fällen fast die gleiche. Da das Beckenphantom in seinem Querschnitt einer Ellipse ähnlich ist, wird der Focushautabstand bei gleichbleibendem Abstand Focus-Pendelzentrum nach den Seiten zu geringer, wie Abb. 2 für alle 10^0 des Pendelwinkels 180^0 und für den Abstand Blende-Oberfläche dartut. Dies führt zu einer Abnahme der Dosiswerte für die dort liegenden Punkte der Oberfläche, wie Bender-Kohler[6]) zeigen, und führt auch zu einer Abnahme der Dosiswerte in der Tiefe und so zu einer geringeren Streuzusatzstrahlung. Auch der Absorption wird noch eine gewisse Bedeutung zugesprochen werden müssen. Daß die Streuzusatzstrahlung beim Beckenphantom tatsächlich etwas geringer ist als beim Oberschenkelphantom, bei dem der Focushautabstand während der ganzen Pendelbestrahlung fast derselbe bleibt, läßt sich am besten durch Vergleich der Einzelversuche zeigen. Wenn man für die verschiedenen Feldbreiten beider Phantome den Winkelbereich betrachtet, der vom Pendelgerät durchlaufen wird, bis das Dosimeter die erste Streuzusatzstrahlendosis von 5r anzeigt, ergibt sich folgende Gegenüberstellung (s. Tabelle V).

Tabelle V

Feldbreite	Oberschenkelphantom		Beckenphantom	
2 cm	180^0—117^0	$= 63^0$	180^0—113^0	$= 67^0$
4 cm	180^0—135^0	$= 45^0$	180^0—130^0	$= 50^0$
6 cm	180^0—148^0	$= 32^0$	0^0— 41^0	$= 41^0$
8 cm	180^0—162^0	$= 18^0$	180^0—149^0	$= 31^0$
10 cm	180^0—160^0	$= 20^0$	180^0—157^0	$= 23^0$

Man ersieht aus Tabelle V, daß am Beckenphantom das Pendelgerät größere Winkel für die erste Streuzusatzstrahlendosis von 5r durchlaufen mußte als am Oberschenkelphantom, und daß die Streuzusatzstrahlung damit beim Becken etwas geringere Werte erreicht.

Zusammenfassung.

1. An zwei Phantomen, welche in ihrer Form den Verhältnissen des menschlichen Körpers nachgebildet waren, wurden über 40 Pendelbestrahlungen für verschiedene Feldbreiten bei konstanter Feldlänge durchgeführt und auf Streuzusatzstrahlung untersucht. Es wurde dabei das Auftreten einer zusätzlichen Streustrahlung, so wie sie von Du Mesnil de Rochemont [18]) für die Rotationsbestrahlung und von Bender-Kohler [16]) für die Pendelbestrahlung beobachtet und beschrieben wurde, erneut bestätigt gefunden.

2. Die Streuzusatzsstrahlung bei der Pendelbestrahlung zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Feldbreite. Die absoluten Werte der Streuzusatzstrahlung nehmen mit der Feldbreite solange zu, bis der Primärstrahlenkegel eine gewisse Breite und Intensität erreicht hat, der gegenüber die Breite und Intensität der seitlichen Keile, aus denen die Streuzusatzstrahlung kommt, immer weniger in Erscheinung tritt. In vorstehenden Versuchen war dieser Fall bei einer Feldbreite von 8 cm erreicht. Bei weiterer Zunahme der Feldbreite nahm die absolute Streuzusatzstrahlung wieder ab.

Anders verhält sich die prozentuale Streuzusatzstrahlung, die von Anfang an mit zunehmender Feldbreite abnimmt. Diese Abnahme erfolgt zunächst bei schmalen Feldbreiten (2 cm und 4 cm) ziemlich rasch, um bei den mittleren Feldbreiten (6 cm und 8 cm) ganz geringe Werte zu zeigen, während sie gegen das letzte Feld von 10 cm Breite fast das Gefälle der kleinen Feldbreiten wieder erreicht (s. Abb. 4).

3. Die berechnete Oberflächendosis wird durch die Streuzusatzstrahlung deutlich erhöht. Bei der kleinsten Feldbreite um über 50 %. Trotz der geschilderten Abnahme des prozentualen Einflusses beträgt die Erhöhung bei einer Feldbreite von 8 cm

noch fast 25 % und bei der größten Feldbreite von 10 cm noch immer 15 % der berechneten Oberflächendosis.

Wenn also auch die Beeinträchtigung und Verschlechterung der Tiefenwirkung durch eine Erhöhung der Oberflächendosis durch Streuzusatzstrahlung mit zunehmender Feldbreite geringer wird, so haben die Versuche doch Werte ergeben, die durch ihre Größe Berücksichtigung verlangen dürfen.

4. Eine eindeutige Abhängigkeit der Streuzusatzstrahlung von der Phantomform wurde nicht festgestellt.

5. Bei direkter Abmessung der Feldbreite auf dem Phantom mit kreisähnlichem Querschnitt berechnet man mit dem Winkel 2γ nach Du Mesnil de Rochemont[15]) eine zu große Oberflächendosis. Dies tritt bei breiten Feldern besonders in Erscheinung und ergibt für die Ableitung der Streuzusatzstrahlung aus gemessener und berechneter Oberflächendosis falsche Werte.

Deshalb wurde für Phantome und Körperteile, die in ihrem Querschnitt der Kreisform nahe kommen, die Berechnung der Oberflächendosis nach einem Winkel ε vorgeschlagen und beim Oberschenkelphantom angewandt. Die Berechnung dieses Winkels ε ist einfach und geschieht nach Formeln, die von den Berechnungen am Kreis bekannt sind.

Voraussetzung für die Anwendung des Winkels ε zu Berechnungen ist, um es nochmals zu betonen, daß das Phantom in seiner Form einem Kreiszylinder nahe steht, und daß die Feldbreite auf der Oberfläche unmittelbar abgemessen wird.

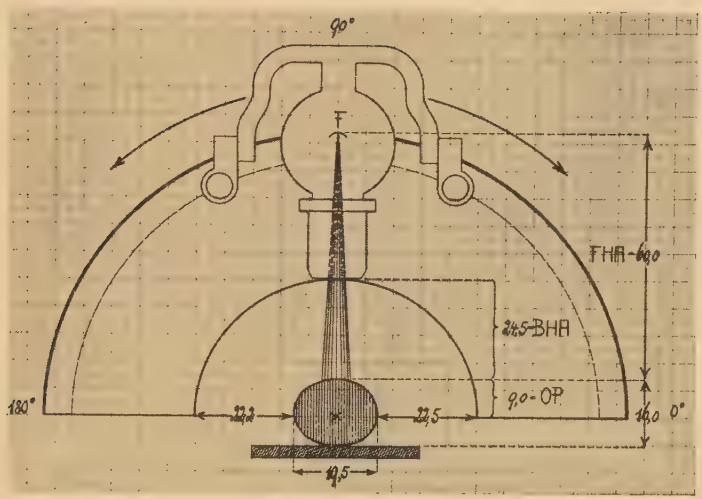

Abb. 1. Das Oberschenkelphantom unter dem Pendelgerät (Querschnitt durch die Versuchsanordnung). × bezeichnet das Pendelzentrum.

F = Focus der Röntgenröhre
FHA = Focus-Hautabstand
BHA = Blenden-Hautabstand
OP = Abstand Phantomoberfläche-Pendelzentrum

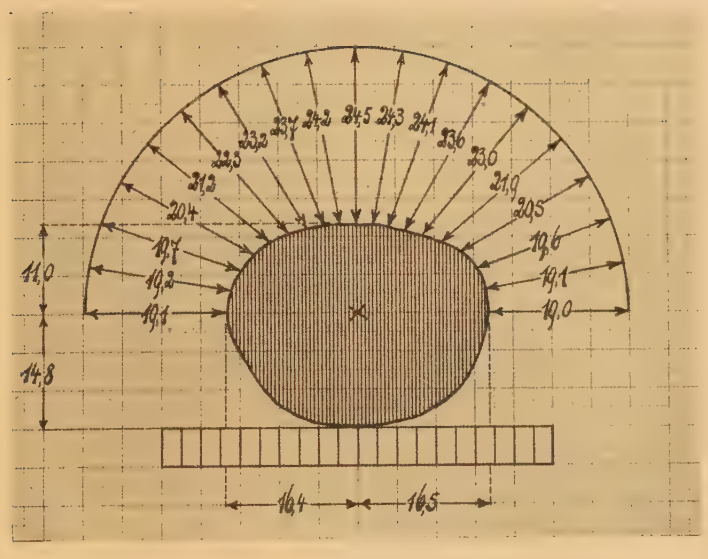

Abb. 2. Das Beckenphantom (Querschnitt). Der Halbkreis stellt den Weg der Blende bei einer Pendelung dar. Für je 10° des Pendelwinkels ist der Abstand Blende-Oberfläche eingetragen. × bezeichnet das Pendelzentrum.

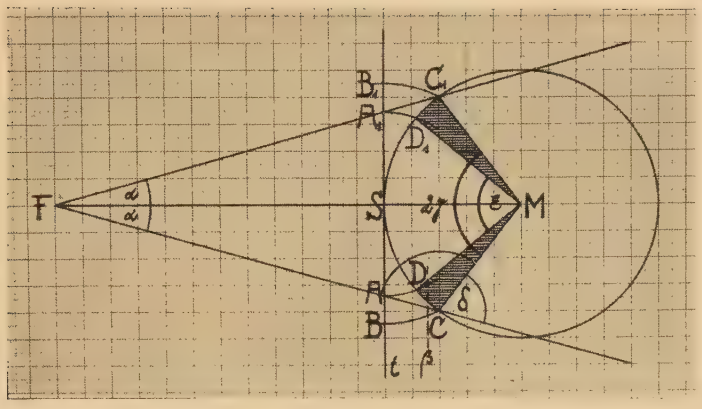

Abb. 3. Vergleich des Winkels ε mit Winkel 2γ für gleiche Feldbreite, aber verschiedene Art der Feldbreitenabmessung.

F = Focus der Röntgenröhre
M = Pendelzentrum
α = halber Öffnungswinkel des Strahlenkegels
t = Tangente in S an den Kreis mit Radius MS
FSM = Zentralstrahl

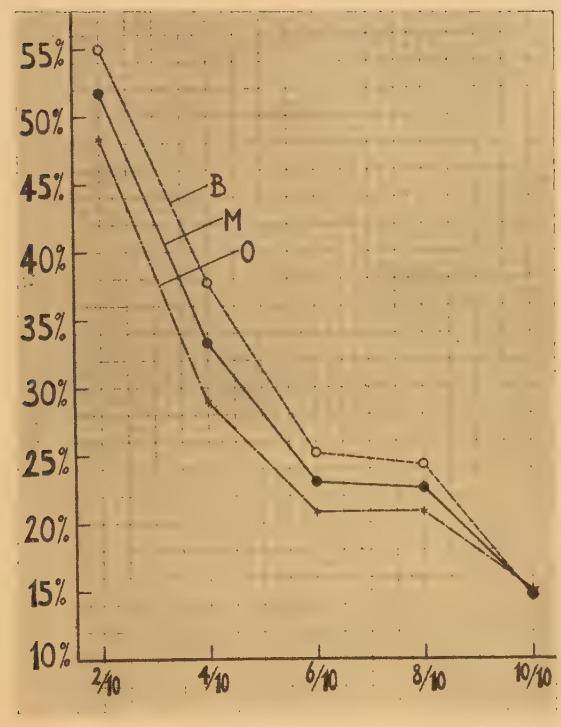

Abb. 4. Darstellung der prozentualen Erhöhung der berechneten Oberflächendosis durch Streuzusatzstrahlung für zunehmende Feldbreite bei der Pendelbestrahlung. (Auf der Ordinate die Prozente, auf der Abszisse die Feldgrößen).

B = Kurve für das Beckenphantom
O = Kurve für das Oberschenkelphantom
M = Kurve der Mittelwerte aus den Kurven B und O
O : Pendeltiefe in 9 cm
B : Pendeltiefe in 11 cm

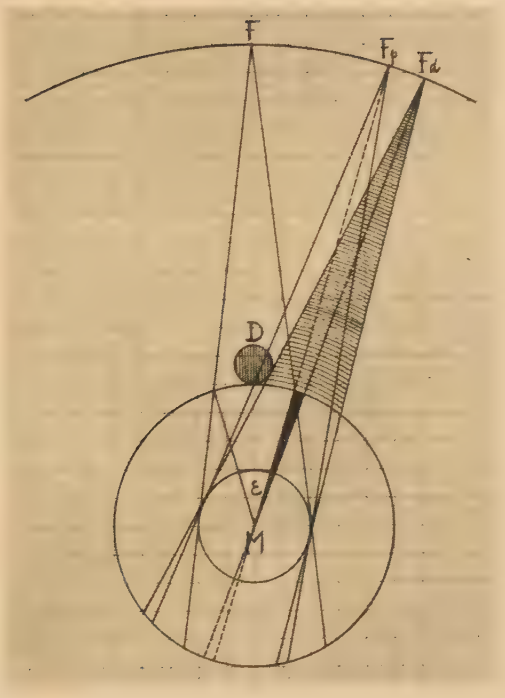

Abb. 5. Die Auswirkung der Dosimeterbreite auf die Vergrößerung des für einen Punkt berechneten Winkels ε. Der schwarz ausgefüllte, spitze Winkel zeigt diese Vergrößerung des Winkels ε für eine Seite.

D = Dosimeter
M = Pendelzentrum
F_p = Focusstand bei Berührung eines Punktes der Oberfläche durch den Randstrahl des Strahlenkegels.
F_d = Focusstand bei Berührung des an der Stelle des Punktes auf der Oberfläche liegenden 18 mm breiten Dosimeters durch den Randstrahl des Strahlenkegels.

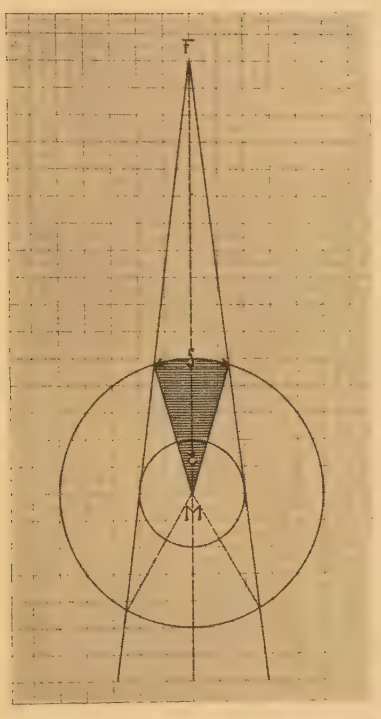

Abb. 6. Für die Berechnungen am Oberschenkelphantom zugrunde gelegte Feldbreitenabmessung. Die Feldbreite f ist unmittelbar auf der Körperoberfläche abgemessen. Winkel ε ist der zugehörige Winkel.

F = Focus der Röntgenröhre
M = Pendelzentrum

Am Schlusse meiner Arbeit ist es mir eine angenehme Pflicht, Herrn Oberarzt Dr. Albert Kohler und Fräulein Dr. Maria Bender für die Überlassung des Themas und die freundliche Unterstützung, sowie für die gegebenen Anregungen meinen ergebensten Dank auszusprechen.

In gleicher Weise gilt mein Dank Herrn Oberarzt Dozent Dr. Felix Jaeger für die freundliche Übernahme des Referates.

Schrifttum.

1. H. Vollmar und B. Rajewsky, Strahlentherapie. Band 60 (1937), S. 524.
2. Borell, Strahlentherapie. Band 2 (1913), S. 683.
3. Rost und Krüger, Strahlentherapie. Band 2 (1913), S. 314.
4. Hans Meyer, Zentralblatt für Gynaekologie. Jahrg. 37 (1913), S. 1741.
5. U. Henschke, Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen. Band 58 (1938), S. 456.
6. M. Bender und A. Kohler, Strahlentherapie. Band 65 (1939), S. 468.
7. Archangelskij, Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen. Band 39 (1929), S. 1129.
8. K. Mayer, Zentralblatt für Radiologie. Band 19 (1935).
9. K. Mayer, Strahlentherapie. Band 64 (1939), S. 134.
10. F. Dessauer und G. Mutherem, Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen. Band 56 (1937). S. 218.
11. F. Dessauer, K. Lion und M. Gökmen, Strahlentherapie. Band 60 (1937), S. 546.
12. A. Kohler, Monatsschrift für Krebsbekämpfung. Jahrg. 7 (1939), Heft 5, S. 125.
13. Nakaidzumi, Strahlentherapie. Band 59 (1937).
14. Nakaidzumi und Motida, Strahlentherapie. Band 60 (1937), S. 307.
15. R. Du Mesnil de Rochemont, Strahlentherapie. Band 60 (1937), S. 648.
16. M. Bender und A. Kohler, Fortsetzung zu „Über Messungen bei der Pendelbestrahlung“ (gegenwärtig im Druck).
17. Nakaidzumi und Miyakawa, Strahlentherapie. Band 66 (1939).
18. R. du Mesnil de Rochemont, Strahlentherapie. Band 66 (1939). S. 593.
19. Das Hammerdosimeter, Beschreibung und Gebrauchsanweisung, herausgegeben von PTW, Freiburg i. B.
20. Sievert, Acta radiologica. Band 15 (1934), S. 193.
21. K. G. Zimmer, Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen, Erg.-Band 49 (1936).
22. R. du Mesnil de Rochemont, Strahlentherapie. Band 63 (1938), S. 176.

Ferner wurde folgendes Schrifttum zur Orientierung beigezogen:

23. Grebe und Nitzge, Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen (Sonderband der Strahlentherapie), Berlin und Wien 1930.
24. Holthusen, Strahlentherapie. Band 59 (1937), S. 563.
25. E. Günsel, Strahlentherapie. Band 65 (1939), S. 639.

Lebenslauf.

Als Sohn des praktischen Arztes Dr. med. Friedrich Katz und seiner Ehefrau Maria, geb. Schneider, wurde ich am 17. Oktober 1914 in Stuttgart geboren.

Von 1921 bis 1924 besuchte ich in Stuttgart die Grundschule. An Ostern 1924 trat ich dort in das Karlsgymnasium ein, um in den Jahren 1928 bis 1930 meine Gymnasialstudien am Gymnasium Ettal fortzusetzen. Dort erkrankte ich im Januar 1930 an allgemeiner schwerer Blutvergiftung und lag bis August 1931 zu Bett. Nach meiner Wiederherstellung trat ich an Ostern 1932 in das Eberhard-Ludwigs-Gymnasium in Stuttgart ein und legte dort im Frühjahr 1935 die Reifeprüfung ab.

Von April bis Oktober 1935 leistete ich studentischen Ausgleichsdienst ab, da ich durch die lange und schwere Krankheit nicht arbeitsdienstfähig war.

Das Medizinstudium begann ich im Winter-Semester 1935/36 an der Universität Tübingen und bestand dort am 30. Okt. 1936 das Vorphysikum und am 1. April 1938 das Physikum. Im Sommersemester 1938 studierte ich in meinem ersten klinischen Semester an der Universität Frankfurt am Main. Während der weiteren vier klinischen Semester studierte ich an der Universität München und bestand daselbst am 19. September 1940 das medizinische Staatsexamen.